



## TELEDETECTION DES CHANGEMENTS ET SIG

**Application à l'étude de l'évolution  
des modes d'occupation des sols  
à LA REUNION entre 1989 et 2002**

**Erwann LAGABRIELLE**

**SYSTEMES  
D'INFORMATIONS  
LOCALISÉES  
POUR  
L'AMÉNAGEMENT  
DES  
TERRITOIRES**

**Directeurs du projet**

**Tuteur SILAT :  
Rapporteurs :**

Cécile MARTIGNAC (CIRAD)  
Pascale METZGER (IRD)  
Edouard BEAUVILLAIN (ENSG)  
Emmanuelle VAUDOUR (INA-PG)  
Laurent PREVOT (ENSAM)

**Novembre 2003**



**Organismes commanditaires**

Pôle Agriculture Durable Environnement et Forêt – CIRAD TERA La Réunion  
Institut de Recherche pour le Développement – La Réunion

**Responsables du projet**

Cécile MARTIGNAC, Géographe (CIRAD)  
Pascale METZGER, Géographe (IRD)

**Tuteur Maître SILAT**

Edouard BEAUVILLAIN (ENSG)

**Rapporteur Maître SILAT**

Emmanuelle VAUDOUR (INA P-G)  
Laurent PREVOT (ENSAM)

**Contexte du projet**

Confronté à une forte croissance démographique, à l'existence de zones naturelles protégées et au nécessaire maintien de son activité agricole, le territoire réunionnais doit aujourd'hui faire face à de nombreux défis. Enjeu de cette compétition, la question foncière est plus que jamais au cœur des préoccupations. Dans ce contexte, les institutions impliquées dans les domaines du développement agricole et de l'aménagement du territoire ont besoin d'informations claires et fiables pour leurs prises de décisions.

Une étude multi-temporelle de l'évolution des modes d'occupation des sols (par télédétection des changements) permettrait de comprendre, de visualiser les changements opérés dans ce domaine depuis 15 ans et de fournir aux décideurs une analyse rétrospective rigoureuse des dynamiques spatiales. Ce travail pourra ainsi alimenter une vision prospective et constituera un outil pertinent pour les groupes de travail chargés des réflexions préalables à la révision du Schéma d'Aménagement Régional.

Pour ce projet, le Cirad collabore avec l'IRD-Réunion, intéressé par les perspectives d'apports en matière de connaissances des dynamiques urbaines et systèmes péri-urbains.

**Projet proposé**

**Télédétection des changements et SIG – Application à l'étude de l'évolution des modes d'occupation des sols à LA REUNION entre 1989 et 2002.**

Le projet proposé a pour but d'établir un diagnostic des dynamiques spatiales à La Réunion depuis 1989 :

- Caractériser les changements d'occupation des sols.
- Quantifier les évolutions : natures et surfaces des changements d'allocation spatiale.
- Proposer une analyse géographique des évolutions identifiées.

**Travail demandé**

1 - Application des techniques de télédétection des changements d'occupation des sols :

- Mise au point d'une méthodologie
- Interprétation de l'occupation des sols en 1989
- Interprétation de l'occupation des sols en 2002
- Techniques de détection des changements sur des associations de canaux multidates

2 – Analyse des résultats

- Mise en forme de couches d'informations géographiques (format vectoriel)
- Analyses thématiques

3 – Valorisation des résultats

- Cartographies 1/100 000<sup>ème</sup>
- (- Communication : site internet, atlas, conférences... > prévu pour 2004)

**Clause de confidentialité : non**

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
<b>A. APPROCHE CONTEXTUELLE.....</b>	<b>3</b>
1. OBJECTIFS DE L'ETUDE .....	3
1.1. Commande.....	3
1.2. Identification des objectifs opérationnels du projet.....	3
1.3. La cartographie d'occupation des sols par télédétection .....	4
1.4. La télédétection des changements.....	5
2. ZONE D'ETUDE .....	6
2.1. Présentation synthétique de La Réunion .....	6
2.2. Modes d'occupation des sols à La Réunion .....	7
3. MOYENS TECHNIQUES.....	9
3.1. Données .....	9
3.2. Matériel .....	10
<b>B. APPROCHE OPERATIONNELLE.....</b>	<b>11</b>
1. METHODOLOGIE .....	11
2. PREMIERE PHASE : TELEDETECTION SATELLITALE.....	12
2.1. Présentation synthétique de l'itinéraire technique .....	12
2.2. Pré-traitements .....	13
2.3. Traitement 2 : Classification d'images et comparaison .....	20
3. SECONDE PHASE : INTEGRATION A UN SIG ET ANALYSE SPATIALE.....	31
3.1. Procédure d'intégration des données .....	31
3.2. Analyse spatiale .....	31
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>32</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>33</b>
<b>TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX.....</b>	<b>35</b>
<b>SIGLES ET ACRONYMES.....</b>	<b>36</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>37</b>

*Cette étude a été commanditée par le Pôle Agriculture Durable, Environnement et Forêt du CIRAD\* et l'IRD\* dans le cadre du projet de recherche appliquée TEMOS\* (Télédétection pour l'Etude des Modes d'Occupation des Sols à la Réunion).*

*L'enjeu du projet TEMOS\* est la compréhension des dynamiques spatiales à La Réunion. TEMOS\* est un projet qui se compose de deux modules opérationnels : Le Module TEMOS\* Actualisation a pour objectif d'établir une cartographie au 1/25 000<sup>ème</sup> de l'occupation des sols à La Réunion en 2003 et le module TEMOS\* Evolution dont la finalité est d'analyser l'évolution des modes d'occupation des sols à la Réunion depuis 1989 (cartographie au 1/100 000<sup>ème</sup>). C'est ce second module qui fait l'objet de la présente étude.*

Le territoire insulaire réunionnais est l'objet d'une compétition intense entre les trois grands modes d'occupation agricoles, urbains et naturels. La dynamique des espaces à La Réunion se caractérise ainsi par une extension rapide des zones urbanisées, un mitage de l'espace agricole par l'habitat résidentiel, une réduction du territoire cannier et une extension des prairies aux dépens de la forêt. L'analyse de ces changements et de leur cinétique a été identifiée comme un objet de recherche dont la compréhension passe nécessairement par une spatialisation.

La finalité de cette étude est donc d'identifier et de quantifier les dynamiques des modes d'occupation des sols depuis quinze ans à La Réunion :

1°) Où se localisent les changements d'occupation des sols, quelle est leur nature ?

2°) Comment peut-on expliquer ces mutations : au niveau de la stratégie des acteurs individuels et/ou au niveau institutionnel (DAF\*, ONF\*, Région, Département, EPCI\*, comité de pilotage de la canne ...) ?

Les techniques de la télédétection et des SIG\* ont été mises en œuvre pour cartographier ces dynamiques et fournir ainsi un outil régional d'aide à la décision en aménagement du territoire.

Cette thèse professionnelle de Mastère SILAT\* s'articule en deux axes. Une première partie de l'étude est consacrée à la mise en contexte du projet (enjeux, présentation de la zone d'étude, champs scientifiques mobilisés). Dans la seconde partie du rapport, nous exposons la méthodologie de traitement des images qui a été développée et les résultats obtenus à partir du traitement de deux scènes SPOT\* (1989-2002).

---

Les sigles et acronymes sont explicités p. 36

# ***A. APPROCHE CONTEXTUELLE***

---

## **1. OBJECTIFS DE L'ETUDE**

### **1.1. Commande**

Le Pôle Agriculture Durable, Environnement et Forêt du CIRAD\* est engagé sur un projet inter-institutionnel de création d'un Système d'information pour la prospective du secteur agricole à la Réunion.

Dans ce cadre scientifique, le projet de recherche appliqué TEMOS\*, initié en 2002, a pour objectif global de permettre une meilleure compréhension des dynamiques spatiales des modes d'occupation des sols à La Réunion.

Cette étude réalisée dans le cadre du projet de mastère SILAT\* doit ainsi permettre l'identification et la localisation des changements d'occupation des sols intervenus à La Réunion depuis 1989. La méthodologie d'étude fait appel aux outils de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique.

### **1.2. Identification des objectifs opérationnels du projet**

Confronté à une forte croissance démographique, à l'existence de zones naturelles protégées et au nécessaire maintien de son activité agricole, le territoire insulaire réunionnais doit aujourd'hui faire face à de nombreux défis liés aux modes d'occupation de l'espace. Les problématiques d'accès à la ressource foncière sont donc essentielles : périurbanisation, phénomène de mitage de l'espace rural, urbanisation vers les Hauts, renforcement de la protection des espaces naturels, réduction des surfaces agricoles... Les interactions entre les différents modes d'occupation du sol ont pour conséquence une intensification de la concurrence foncière.

Dans ce contexte, les institutions impliquées dans les domaines du développement agricole et de l'aménagement du territoire à La Réunion (Conseils Régional et Départemental, Comité de pilotage de la canne, DAF\*...) ont besoin d'informations claires et fiables pour leur prise de décision dans le cadre de la mise en œuvre de leurs politiques publiques. Par ailleurs, cette étude constituerait un outil pertinent pour les groupes de travail chargés des réflexions préalables à la révision du Schéma d'Aménagement Régional.

En réponse à cette demande d'informations spatialisées, nous avons défini les deux objectifs opérationnels suivant :

***1) Analyser la relation entre la stratégie des acteurs de l'aménagement du territoire et les changements d'occupation du sol observés.***

***2) Fournir un outil spatialisé d'aide à la décision d'aménagement à La Réunion : la cartographie des changements d'occupation des sols depuis 1989 (échelle 1/100 000<sup>ème</sup>).***

### **1.3. La cartographie d'occupation des sols par télédétection**

Les images de télédétection constituent une information homogène et objective pour l'établissement d'une cartographie d'occupation des sols (GIRARD & GIRARD, 1999). Deux options méthodologiques sont ouvertes pour l'établissement de ce type de cartographie : faire appel aux techniques de la photo-interprétation (projet européen Corine Land Cover) ou utiliser les techniques de classification automatique des images (si les contraintes de temps et de moyens sont importantes).

#### **□ Possibilités et limites de la télédétection pour l'établissement d'une cartographie de l'occupation des sols**

Afin d'établir une cartographie de l'occupation des sols par télédétection, il est nécessaire

- 1) d'acquérir une connaissance plurithématique de la zone d'étude et,
- 2) d'identifier les possibilités et les limites des techniques de la télédétection sur cette zone (« il ne faut pas chercher une information plus précise que ne le permettent les règles de réalisation de cette carte » (GIRARD & GIRARD, 1999)).

La cartographie de l'occupation des sols par télédétection est ainsi régie par des contraintes thématiques (les modes d'occupation à identifier) et des contraintes techniques (les modes d'occupation de l'espace identifiables à un seuil de confusion acceptable).

#### **□ Une phase essentielle de cadrage des objectifs du projet cartographique**

La phase de cadrage des objectifs est essentielle en cartographie d'occupation des sols par télédétection : il faut mettre en concordance les objectifs du commanditaire et les contraintes qui s'imposent au télédéacteur (contraintes financières, techniques ou temporelles).

Ainsi, les techniques d'analyse d'image permettent de détecter des états de surface auxquels on pourra associer, ou non, une sémantique thématique. La distinction est nécessaire et doit être clairement signifiée au commanditaire avant le lancement du projet : par exemple, un sol nu détecté comme tel peut être interprété comme un labour ou comme un parking.

Les objectifs du projet de cartographie (échelle de sortie, surface minimale des plages cartographiques et nomenclature) doivent également concorder avec la résolution du capteur : par exemple, à une résolution de 20 m, on identifie les champs de canne mais pas les jardins individuels. De même, les bandes radiométriques du capteur ne permettent pas de discriminer tous les types d'occupation du sol que l'on identifie aisément au sol.

En résumé, le projet de cartographie d'occupation des sols doit être conçu avec des objectifs bien cadrés en fonction des possibilités et des limites de l'outil mis en œuvre. On doit donc définir une échelle de sortie cartographique ainsi qu'une taille de plage cartographique minimale. Cette phase de cadrage est essentielle même si dans la pratique, la démarche reste en partie exploratoire (en particulier, la nomenclature initiale est révisée au cours du projet).

## **1.4. La télédétection des changements**

"La détection des changements est le processus d'identification des différences d'état d'une zone en l'observant à des dates différentes" (INGLADA, 2001) : on cherche à quantifier (aspect spatial) et à qualifier (aspect sémantique) le changement détecté. Les facteurs limitant cette détection des changements sont les différences de conditions atmosphériques, de géométrie d'acquisition et de condition au sol (CHAVEZ & MACKINNON, 1994). Les domaines d'application de la détection des changements sont nombreux : déforestation (COLLINS & WOODCOCK, 1996), changements d'occupation des sols (ULBRICHT & HECKENDORFF, 1998), évolution des franges urbaines, etc.... Nous nous sommes intéressés en particulier aux techniques applicables à des données de télédétection haute résolution - 10 à 30 m – (SPARR, 1998).

### **□ Contraintes techniques et choix méthodologiques**

La télédétection des changements implique des procédures et des choix spécifiques (résolution du capteur, répétitivité, choix des images, corrections radiométriques et géométriques). Avant toute chose il faut que la nature des changements étudiés soit détectable par le capteur : il faut établir le rapport entre la résolution de ce dernier et l'échelle du phénomène dynamique que l'on cherche à quantifier et à qualifier. La répétitivité des prises de vue doit donc être en conformité avec la cinétique des changements.

On distingue globalement deux types de méthode de détection des changements : la comparaison d'images pixel à pixel (on étudie la trajectoire radiométrique du pixel sur des combinaisons d'images multitudes) ou la comparaison de classifications (on compare des images classées).

### **□ Interprétation des résultats**

Les changements identifiés doivent être analysés avec prudence en tenant compte

- 1) de la proportion de changement/faux changement (confusion) et,
- 2) de la proportion des changements intra-annuels/inter-annuels (liés entre autres aux pratiques culturelles ou aux différences de conditions atmosphériques lors des prises de vue).

## 2. ZONE D'ETUDE

### 2.1. Présentation synthétique de La Réunion

#### Milieu physique

La Réunion est une île tropicale de l'hémisphère sud ( $55^{\circ}29'$  longitude est -  $21^{\circ}53'$  latitude sud), qui est la partie émergée d'un volcan bouclier de 7000 m de hauteur (**Carte 1**). La surface terrestre de l'île est de 2511 km<sup>2</sup>, le sommet est le Piton des Neiges à 3069 m et le volcan actif, le Piton de la Fournaise culmine à 2631 m (cf **Annexe 1**, p 34).



**Carte 1 :** *Situation de l'île de La Réunion*

Réalisation : Erwann Lagabrielle, 2003, Source : ESRI data, 2001

Le climat de La Réunion est de type tropical humide marqué par 2 saisons :

- l'hiver austral, de mai à novembre, est frais (en moyenne  $20^{\circ}$  sur le littoral et  $11^{\circ}$  en montagne) et sec,
- l'été austral, de décembre à avril, est nettement plus chaud ( $26^{\circ}$  C sur le littoral à  $22^{\circ}$  C en montagne) et pluvieux, avec des précipitations extrêmes et des phénomènes cycloniques.

On peut distinguer 2 principales régions climatiques : la côte "au vent", orientée Nord Est face aux alizés, reçoit 70% des précipitations (3 à 10 m/an) et la côte "sous le vent" orientée Sud Ouest qui reçoit moins de 2 m / an et de façon très irrégulière. Parallèlement, il faut également croiser cette opposition de versant avec l'altitude qui accentue les différentiels thermiques et pluviométriques (on parle des "hauts" de l'île).

#### Milieu anthropique

La Réunion est une région monodépartementale regroupant 24 communes (cf **Annexe 2**, p 40) et découpée en 4 micro-régions (Nord, Sud, Est, Ouest) qui s'apparentent grossièrement aux arrondissements des 4 sous-préfectures.

La population de La Réunion est de 706 300 habitants (RGP\* 1999, INSEE\*), dont près de 85% vit sur la bande côtière qui concentre l'essentiel des activités économiques. La pression démographique sur l'espace croît très rapidement, puisqu'il y avait 270 000 habitants en 1950 et qu'il en est prévu plus d'un million dans 25 ans. La densité de population est actuellement de 282 hab/km<sup>2</sup>. Le taux de natalité est d'environ 20 ‰ (contre 13 en métropole, source : Tableau Economique de La Réunion 2002-2003).



La SAU\* (surface agricole utile) de l'île est de 49 559 ha (Tableau Economique de La Réunion 2002-2003), soit moins du quart du territoire, couverte principalement de canne à sucre (environ 50 %). Les friches productives et prairies couvrent environ 20% de cette SAU\*, le maraîchage et l'arboriculture fruitière en occupant chacun 10%.

## **2.2. Modes d'occupation des sols à La Réunion**

### **2.2.1. Présentation synthétique**

Les divers modes d'allocation de l'espace à la Réunion sont présentés synthétiquement ci-dessous. L'objectif de cette présentation est de fournir un cadre initial à l'interprétation et à la classification des images de télédétection à La Réunion :

**Les espaces urbains :** La répartition actuelle de la population dans l'espace est très polarisée, avec une saturation des micro-régions Nord et Ouest et, d'une façon générale la zone littorale par opposition aux mi-pentes et à la zone des Hauts. L'urbanisation à La Réunion se caractérise également par un phénomène de mitage de l'espace rural particulièrement marqué dans le sud et l'ouest de l'île. Les zones urbanisées concentrent 609 000 habitants (RGF\* 1999, INSEE\*) sur environ 30 000 ha.

**Les espaces agricoles :** l'espace agricole à la Réunion est dominé par la culture de la canne à sucre (0 à 900 m d'altitude) et les prairies en altitude (> 900 m). On notera l'existence d'une zone de cultures maraîchères dans les hauts du Tampon. Une petite agriculture spatialement distribuée sur l'ensemble du territoire agricole réunionnais se maintient, elle est caractérisée par des parcelles hétérogènes de petite surface (< 1 ha). L'arboriculture est également pratiquée, les parcelles étant dispersées sur l'ensemble de l'espace agricole de l'île (vergers et palmeraies principalement).

**Les espaces naturels :** L'espace naturel (c'est à dire ici non agricole et non urbain) représente une surface importante du territoire terrestre réunionnais, il intègre les forêts (120 000 ha de surface boisée, soit près de 50% de la surface de l'île) composées de conifères (cryptoméria) et de feuillus, les fortes pentes (non urbanisables et non cultivables), les fonds de ravine, le lit des rivières, une partie du littoral sous le vent (savane), la végétation buissonnante des hauts et des sols nus (au delà de 2500 m). Près de 40% de la surface de l'île est soumis au régime forestier de l'ONF\*, incluant les propriétés des différentes collectivités que sont l'Etat, la Région, le Département, les Communes et le Conservatoire du Littoral. Près de 800 ravines ruissellent sur les pentes de l'île. Les 155 principaux cours d'eau constituent 1500 km de linéaire. Seulement 13 d'entre eux sont des rivières pérennes.

### **2.2.2. Etats de surface et phénologie du couvert végétal à La Réunion**

L'état de surface du sol intègre la composition et l'organisation de la surface du sol à un instant donné, il comprend le couvert végétal (d'après GIRARD & GIRARD, 1999). Pour l'établissement de la cartographie de l'occupation des sols à partir d'une image de télédétection, la connaissance des variations d'état de surface liées uniquement aux conditions climatiques ou aux pratiques culturelles est essentielle pour interpréter ou classer une image. Ces variations phénologiques sont synthétisées ci-dessous

#### ❑ **Variations phénologiques liées au climat**

En hiver, saison sèche, la végétation chlorophyllienne est moins active sur l'ensemble de l'île. L'opposition entre la côte sous le vent sèche et la côte au vent humide est très marquée en été (saison humide). Par ailleurs, les fortes variations climatiques inter-annuelles modifient également de façon marquée la phénologie du couvert végétal.

En hiver, les sols nus situés en altitude au-delà de 2500 m peuvent être recouverts d'une couche de gel le matin, ce qui modifie la signature spectrale et donc le comportement numérique de ces sols sur l'image.

#### ❑ **Phénologie et pratiques culturales de la canne à sucre et des prairies**

La canne à sucre est une culture pérenne. Elle est récoltée de juin à décembre (période de coupe). La surface de canne mature est donc maximale au mois de juin. La dynamique culturale simplifiée d'une parcelle de canne à sucre est le suivant (entre parenthèses : le groupe d'affectation lors la classification texturale):

- plantage de la canne à sucre (« sol nu peu végétalisé »)
- canne à sucre mature (« canne à sucre »)
- coupe de la canne (« paillis de canne »).

La phénologie des prairies et de la canne est également liée aux conditions climatiques saisonnières (végétation sèche en hiver). Pour les prairies, le pâturage modifie également l'état de surface. Comme pour les autres couverts végétaux, le gradient altitudinal est marqué et se traduit par une activité chlorophyllienne décroissante vers les hauts de l'île.

### 3. MOYENS TECHNIQUES

#### 3.1. Données

##### 3.1.1. Données de télédétection

###### □ Images satellitaires

TEMOS\* étant affilié au projet « BD Isle\_Réunion » ([http://medias.obs-mip.fr/isle\\_reunion/](http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/)), nous disposions gratuitement d'une base de données d'images satellitaires. L'objectif de la base de données ISLE\_Reunion, réalisée sur l'initiative du CNES, est de donner aux scientifiques de divers domaines (n'utilisant pas obligatoirement la télédétection) la possibilité d'utiliser de façon aisée des données satellitaires adaptées à leur problématique, et d'interfacer leurs modèles avec des données spatiales pour développer de nouvelles applications. Les images, mises en ligne via un FTP en accès contrôlé, sont issues de prises de vue réalisées sur La Réunion par les satellites Spot\* de 1986 à 2003.

###### > *Choix des images*

Nos critères de sélection des images satellites ont été :

- l'année d'acquisition (le plus grand écart temporel entre les deux images retenues),
- la saison d'acquisition (idéalement le mois de juin),
- l'heure d'acquisition (le plus possible la même),
- le champ au sol de l'image (l'ensemble de l'île),
- la nébulosité (minimale),
- l'angle d'incidence (le même pour les deux images).

Nous avons estimé que les deux images suivantes combinaient au mieux ces critères (**tableau n°1**) :

	Satellite	Date Heure	Mode spectral	Résolution finale	Nébulosité	Angle d'incidence	Centre de la scène
<b>Image 1</b>	Spot 1	24-09-1989 06:20:35	20 m couleur	20 m	< 10 %	- 25.8	21°31' S 55°26' E
<b>Image 2</b>	Spot 4	14-08-2002 06:23:24	20 m couleur	10 m	< 25 %	-19.2	21°31' S 55°25' E

**Tableau n°1 : Caractéristiques techniques et géographiques des images retenues**

Par ailleurs, dans le cadre du second module du projet TEMOS\* (TEMOS\* Actualisation), nous disposions d'une image Spot 2.5 orthorectifiée couvrant l'ensemble de l'île de La Réunion. Cette image a été utilisée afin de construire et de valider la classification des deux images (digitalisation des parcelles d'entraînement). On notera que la nébulosité de cette image était incompatible avec son intégration aux processus de classification et de détection des changements.

### ❑ **Photographies aériennes**

Nous disposons de la BD Ortho 1997 ® IGN issue de la couverture aérienne IGN\* réalisée sur l'île de La Réunion en 1997 (résolution 0.25 m). Nous avons également identifié une couverture aérienne du département réalisée en 1989. Actuellement, cette couverture est disponible à la DDE\* de La Réunion. Les émulsions photographiques seront empruntées début novembre en vue de la validation de la classification de l'image de 1989.

### **3.1.2. Les données vectorielles**

La BD Topo 1997 ® IGN est un corpus de couche d'information proposé par l'IGN\*. Cette couche d'information est d'un intérêt capital pour notre étude. La couche qui nous a particulièrement intéressé est l'occupation des sols. Cependant, la couverture est incomplète et certains polygones sont peu précis. Malgré cela, cette information constitue un corpus informationnel globalement fiable. En complément de la BD Topo ® IGN, la DAF\* Réunion a entrepris de constituer une base de données géoréférencées du parcellaire cannier sur la base de la déclaration des planteurs. Cette couche d'information est valide pour 2002 avec 10 % d'omissions (source : CIRAD\* Pôle canne).

### **3.1.3. Autres données**

En plus de ces données vectorielles, nous disposons également des scan 25 ® IGN (2000) sur l'ensemble de l'île. Cette cartographie au format numérique et papier (TOP 25 ® IGN) nous a permis d'organiser nos missions de terrain. Nous avons également utilisé le Modèle Numérique de Terrain (MNT\*) MNT ® IGN (pas initial de 25 m) pour l'orthorectification des images (cf **Annexe 2 p. 40**).

## **3.2. Matériel**

### **3.2.1. Matériel informatique**

#### ❑ **Hardware**

Deux PC de bureau (environnement Windows)

#### ❑ **Software**

Traitement d'image

- Erdas Imagine 8.4 pour le traitement des images satellitales : corrections géométriques, classification texturale, calcul de néocanaux (ACP, indices), calculs sur le modèle numérique de terrain (ombre, pente), calcul des matrices de confusion.
- OASIS pour le traitement structural des images classées.

Traitement SIG\*

- Arcview 3.2 et extensions : manipulation des thèmes vecteurs, intégration des données de terrain, cartographie, analyse spatiale.

### **3.2.2. Matériel de terrain**

#### ❑ **GPS\***

2 GPS\* Garmin Etrex : précision maximale de 5 m avec une constellation optimale des satellites.

#### ❑ **Photographie**

1 appareil de photographie numérique couplé au logiciel Cool 360 qui permet la création automatique de panoramas à partir d'une série de photographies.

## B. APPROCHE OPERATIONNELLE

### 1. METHODOLOGIE

La commande et les objectifs du projet définis avec l'équipe du projet TEMOS\* impliquaient de cartographier les modes d'occupation des sols et les changements opérés entre 1989 et 2002 à La Réunion.

Afin de répondre à ces objectifs, le projet a été organisé en deux étapes :

#### Etape 1 : Télédétection satellitale

Cette étape principale est basée sur l'analyse par télédétection satellitale des modes d'occupations des sols sur les images aux deux dates (1989-2002). Cette étape a été planifiée et réalisée en 3 mois et demi (campagne de terrain incluse). L'itinéraire technique a été défini à partir de la synthèse bibliographique réalisée au mois de juin dans le cadre du projet de Mastère.

#### Etape 2 : Intégration SIG\* et analyse spatiale

La seconde étape du projet est l'intégration des résultats de l'étape 1 à un Système d'Information Géographique en vue de leur interprétation et de leur synthèse avec d'autres sources de donnée. Le SIG\* sera alors utilisé comme outil de synthèse (BONN, 1996).

L'étape 2, planifiée pendant le projet de mastère, sera réalisée durant le mois de novembre. Aussi, seuls les résultats de l'étape 1 (télédétection satellitale) sont présentés dans ce rapport.

Le planning de travail a été établi comme suit (tableau n°2):

		Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre
Etape 1	PHASE 1 – Compréhension des objectifs, bibliographie, méthodologie						
	PHASE 2 - Choix des images						
	PHASE 3 - Pré-traitements						
	PHASE 4 : Terrain						
	PHASE 5 - Traitement des images						
	PHASE 6 - validation						
Etape 2	PHASE 7 – Intégration SIG						
	PHASE 8 - Analyse thématique des données traitées						
	PHASE 9 - Mise en forme des données - valorisation des résultats						
	>>> Localisation	Montpellier	Saint-Denis, La Réunion				Montpellier

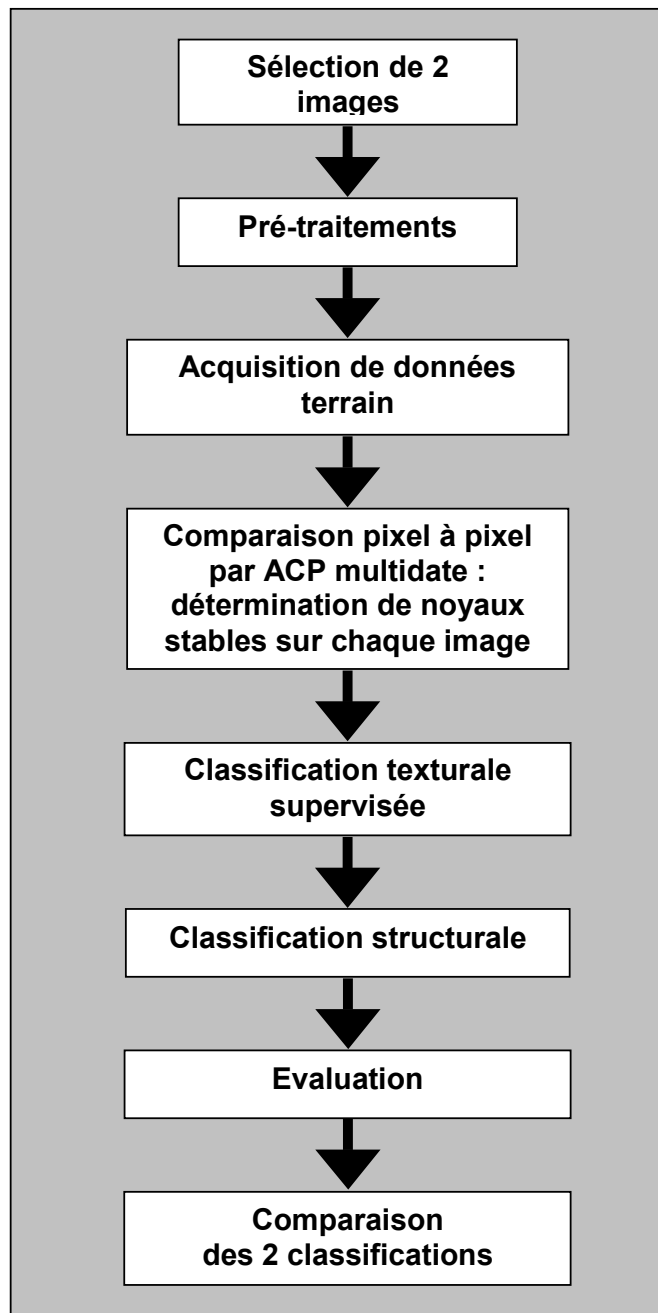
Tableau n°2 : planning de projet

## **2. PREMIERE PHASE : TELEDETECTION SATELLITALE**

### **2.1. Présentation synthétique de l'itinéraire technique**

Comme nous l'avons vu précédemment, la télédétection des changements peut se faire selon deux techniques : comparaison pixel à pixel ou comparaison de classifications. Nous avons expérimenté les deux options : la technique de détection des changements pixel à pixel s'est révélée inadaptée pour détecter tous les changements d'occupation des sols à La Réunion en raison de la diversité des modes d'occupation des sols et des changements les affectant. Néanmoins, la technique a été utilisée avec succès pour détecter l'apparition du bâti entre 1989 et 2002.

Nous avons finalement mis en œuvre une procédure technique combinant détection des changements pixel à pixel (ACP\* multidate) et comparaison de classifications. La chaîne de traitement simplifiée est présentée schématiquement ci-après (**figure n°1** page suivante). Il s'agit d'une technique qui, à notre connaissance, n'a jamais été mise en œuvre.



**Figure n°1 : Schéma simplifié de la chaîne de traitement des images**

## **2.2. Pré-traitements**

### **Correction géométrique des images**

La qualité des corrections géométriques des images est essentielle en télédétection des changements. Ces corrections permettent la comparaison des scènes positionnées dans un même référentiel géographique ainsi que leur superposition à d'autres sources de données (vectorielles notamment). Les paramètres et modalités de ces corrections géométriques pour cette étude sont présentés dans la **figure n°2** (p. 15).

- L'image 2002 a été recalée à partir d'un fichier de 80 points d'amer (GCPs\*) relevés sur le terrain à l'aide d'un GPS\* différentiel. Ces points d'amer ont été choisis et relevés par E. Bappel dans le cadre du projet Sucrète du CIRAD\* Amis. La topographie de La Réunion étant caractérisée par un relief important, nous avons effectué l'orthorectification de l'image (en utilisant le Modèle Numérique de Terrain).

- L'image de 1989 a ensuite été orthorectifiée par rapport à cette première image (choix de 80 points d'amer communs aux deux images : géoréférencement image à image).

Le calcul de chaque image a été effectué selon une équation du second degré. Pour le calcul de la valeur des pixels, nous avons choisi d'effectuer une interpolation bicubique (BANCAREL, 2002, MAS, 2000). Ce mode d'interpolation a été préféré au calcul au plus proche voisin suite à une inspection visuelle réalisée lors de la phase de classification texturale. La technique par interpolation bicubique modifie le compte numérique de certains pixels mais cet effet est compensé par la technique de classification mise en œuvre (maximum de vraisemblance).

Pour ces deux orthorectifications, le contrôle de la validité s'est fait par l'estimation de l'erreur standard, RMSE\* (Root Mean Square Error). La RMSE\* n'étant pas un indicateur totalement fiable, la validation des corrections géométriques a été effectuée visuellement par superposition des images. Le seuil retenu pour cette étude est de moins de 1 pixels, valeur minimale préconisée en détection des changements (BANCAREL, 2002).

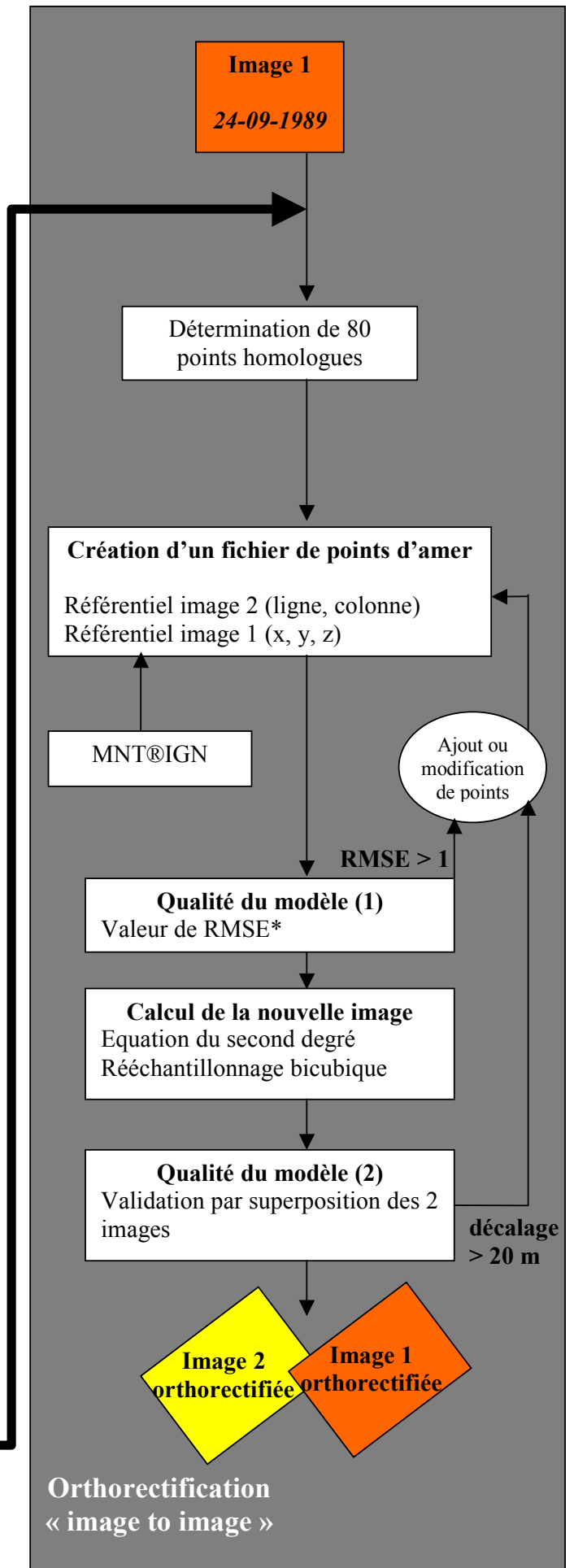
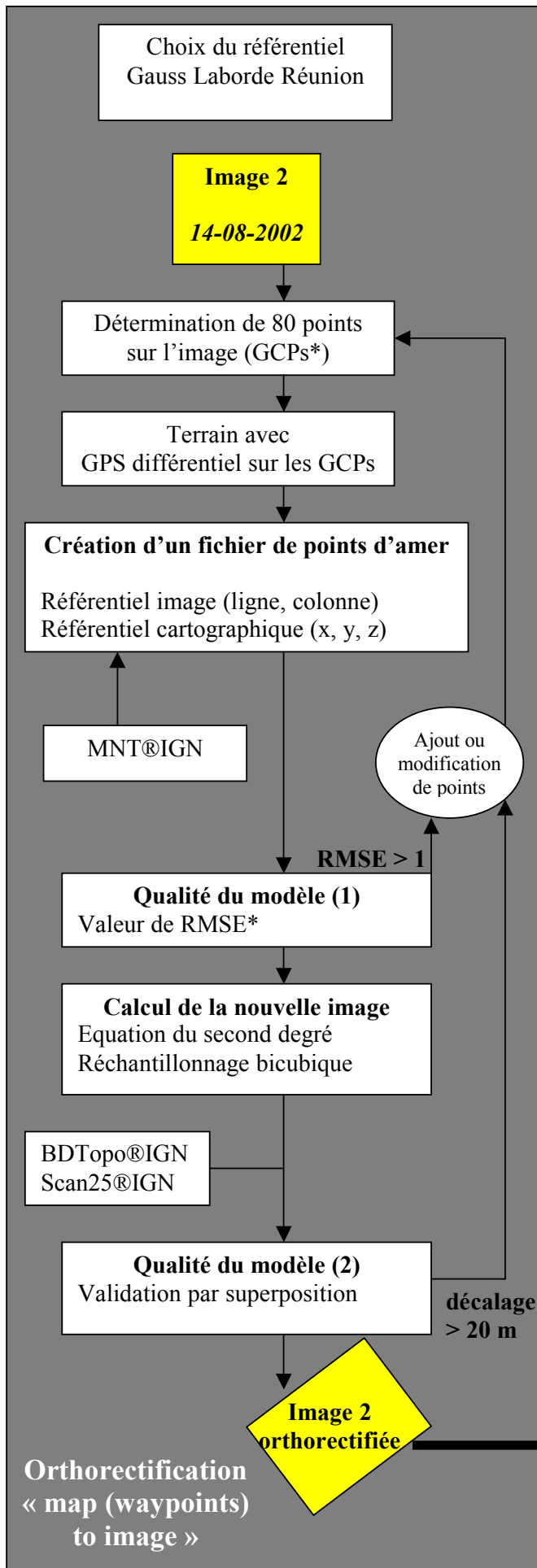
### **Corrections radiométriques**

Les techniques de détection des changements que nous avons utilisées ne nécessitent pas de corrections radiométriques (MAS., 2000).

**(Page suivante)**

**Figure n°2 : Corrections géométriques des images (adapté de BANCAREL, 2002)**





## **Harmonisation des résolutions des deux images**

Afin de comparer deux images par superposition pixel à pixel, il est nécessaire qu'elles aient la même résolution. Ainsi, le calcul de l'image de 2002 a également intégré une modification de la résolution (on est passé d'une résolution de 10 m à une résolution de 20 m). L'interpolation bicubique a permis de reproduire mathématiquement l'intégration radiométrique au sol correspondant à cette résolution.

## **Sélection des canaux**

L'hypothèse de comparabilité des images classées reposant sur l'homogénéité des traitements les affectant, le choix des canaux a été contraint par les bandes spectrales du satellite Spot\* 1 : vert, rouge et proche infrarouge. La bande MIR\* de Spot\* 4 a donc été exclue des traitements.

## **Masquage des nuages**

Pour chaque image, nous avons exclu les nuages et leurs ombres par masquage géographique digitalisé à l'écran (cf **Figure n°3, page suivante**).

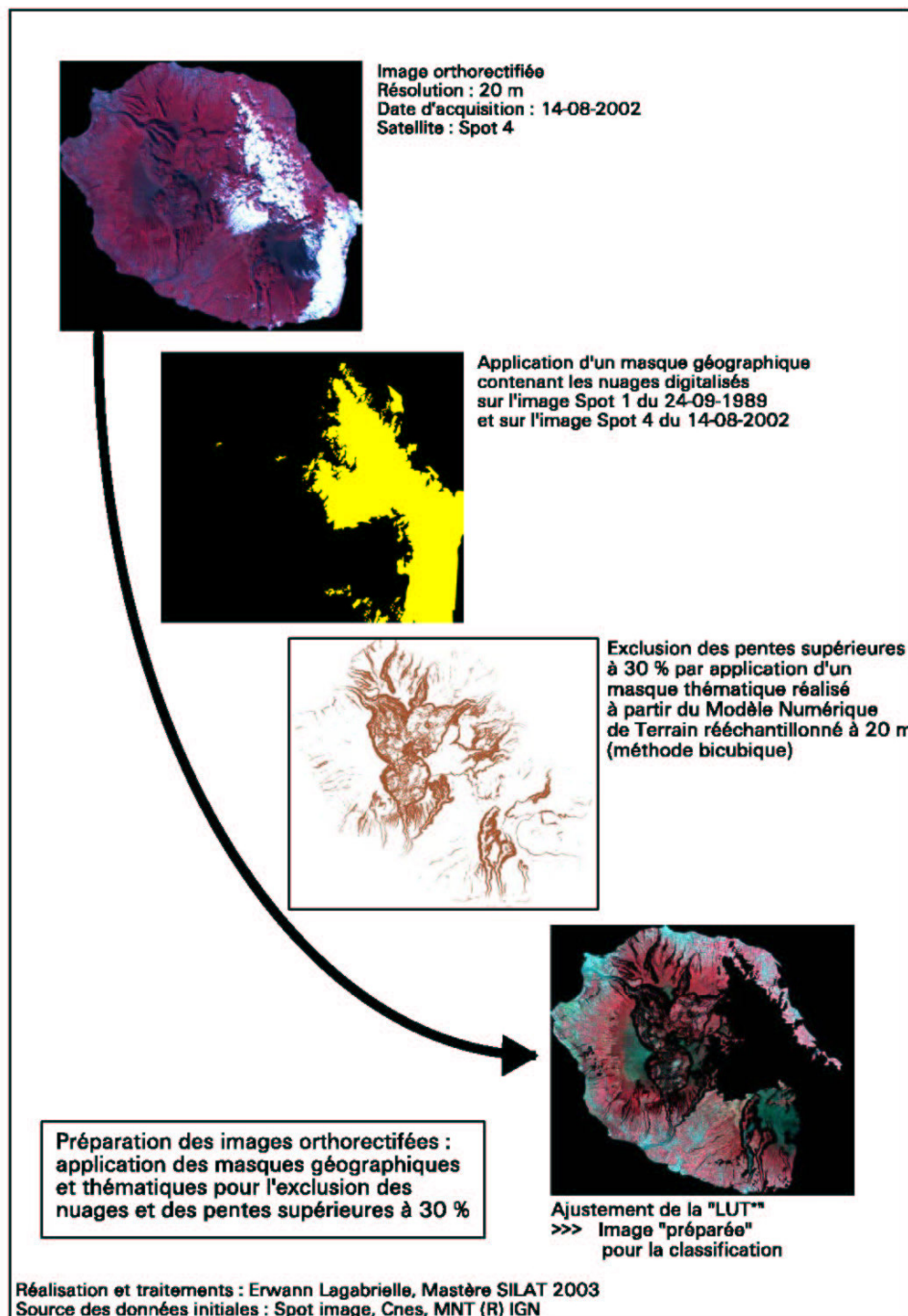
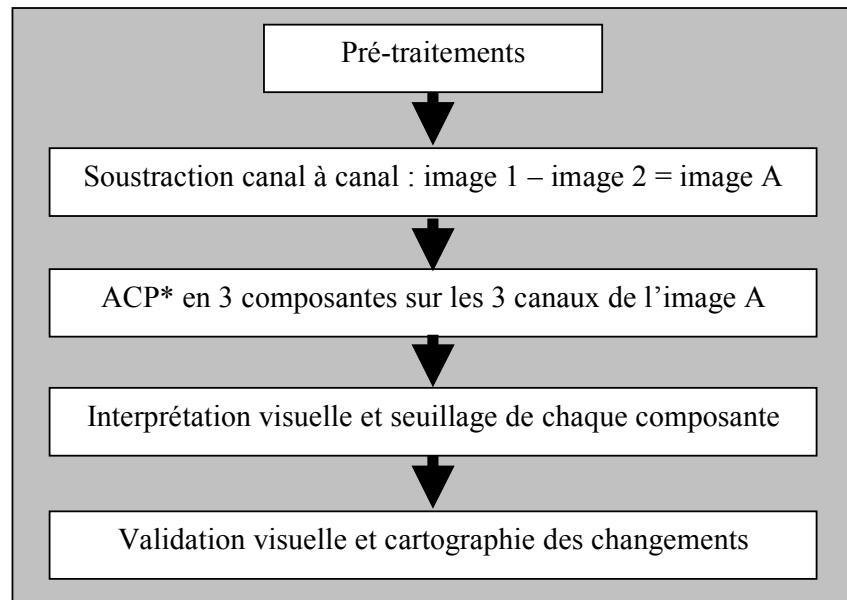


Figure n°3 : Préparation des images

## 2.3. Traitement 1 : Tentative de détection des changements par ACP\* multitime

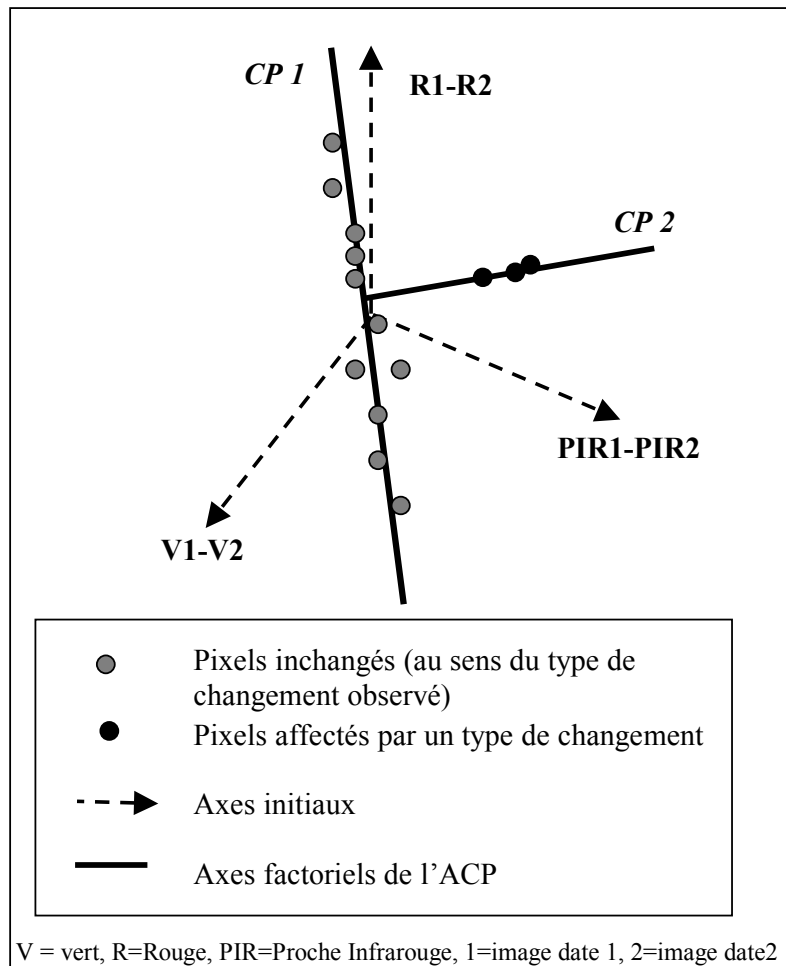
### 2.3.1. Principe

L'Analyse en Composantes Principales est une technique d'analyse multivariable qui sert, en télédétection à réduire le nombre de composantes spectrales (cf **Annexe 3, p 42**). Elle est souvent utilisée en détection des changements (MOISAN *et al.*, 1999, SINGH et HARRISON, 1985). Nous avons appliqué l'ACP\* à une différence d'images canal à canal. L'intérêt de cette technique est de concentrer l'information concernant les changements sur certaines composantes (**figure n°4**).



**Figure n°4 : Traitements des images pour la détection des changements par ACP\* multitime**

Chaque composante de l'ACP\* va ainsi permettre de cartographier un ou plusieurs types de changements par seuillage des comptes numériques. Une analyse visuelle des composantes de l'ACP\* doit donc être entreprise. Pour mieux comprendre le principe, on peut l'illustrer avec la figure suivante (**figure n°5, page suivante**), qui représente la distribution des pixels dans l'espace tridimensionnel des axes résultant de l'ACP sur la différence des canaux des deux images.



**Figure n° 5 : Principe de l'ACP\* multivariate pour la détection des changements**

### 2.3.2. Résultats

Dans la pratique, la technique s'est révélée efficace uniquement pour les pixels dont la trajectoire radiométrique temporelle était contrastée : on a ainsi utilisé la méthode avec succès pour la détection de l'apparition du bâti (sur la première composante cf **Annexe 4, p 44**). L'inspection visuelle des composantes principales n'a pas permis de discriminer avec précision d'autres changements d'occupation des sols. En particulier, les changements affectant la végétation sont détectés mais il sont difficilement interprétables.

Pour notre étude, la composition des composantes principales est la suivante (ACP sur la différence d'images canal à canal : canaux V\*R\*PIR\* 2002 – canaux V\*R\*PIR\* 1989) :

$$\begin{aligned}
 \text{Composante 1} &= 0.96 V_{dif} & + 0.2 R_{dif} & - 0.18 PIR_{dif} \\
 \text{Composante 2} &= 0.07 V_{dif} & + 0.5 R_{dif} & + 0.89 PIR_{dif} \\
 \text{Composante 3} &= 0.26 V_{dif} & - 0.86 R_{dif} & + 0.43 PIR_{dif}
 \end{aligned}$$

Avec  $V_{dif} = V_{2002} - V_{1989}$   
 $R_{dif} = R_{2002} - R_{1989}$   
 $PIR_{dif} = PIR_{2002} - PIR_{1989}$

Nous avons constaté que la première composante traduisait bien les gains de compte numérique liés à l'apparition du bâti (en particulier, du fait de la pondération du facteur variation du canal Vert entre les deux dates (0.96)). Cette composante permet d'identifier le nouveau bâti (et marginalement les destructions de bâti) d'autant plus qu'à La Réunion, la transaction spatiale est réalisée avec un mode d'occupation végétale (on passe d'un couvert végétal vert à un couvert en tôle blanc ou rouge).

Nous avons également constaté visuellement que la seconde composante comportait les variations du couvert végétal (variation de l'activité photosynthétique, changement de mode cultural...). La diversité de la nature des changements de couvert végétal ne nous a cependant pas permis d'en établir la cartographie, les changements observés étant à la fois intrinsèques (variation phénologique interannuelle) et extrinsèques (transaction d'un mode cultural à un autre par exemple).

La technique de l'ACP\* sur la différence d'images multodate permet de détecter les changements sans pour autant permettre d'en identifier la nature. Implicitement, une cartographie des changements à partir de cette seule technique est impossible dans un contexte de diversité des modes d'occupation des sols et des changements les affectant.

D'autres méthodes de détection des changements pixel à pixel ont également été testées sans donner de résultat probant : soustraction d'images et soustraction de NDVI\* entre autres. Compte tenu de l'insuffisance de ces résultats, nous avons opté pour la technique de la comparaison de classification. Toutefois, les résultats de cette expérimentation technique nous ont permis de déterminer des zones de changement/non-changements utiles pour numériser des parcelles d'entraînement de classification communes et stables sur les deux images.

## 2.4. Traitement 2 : Classification d'images et comparaison

### 2.4.1. Principe

La technique de la comparaison de classifications d'image permet de localiser et d'identifier les changements d'occupation du sol. Une méthode de classification a ainsi été appliquée à chaque image en vue de les comparer par la suite. La difficulté est ici de reproduire exactement la même classification sur chaque image (mêmes plages cartographiques si celle-ci sont stables dans le temps).

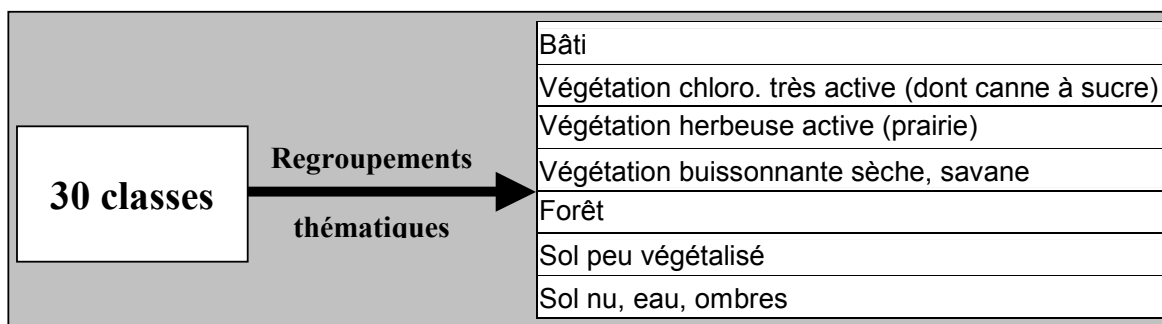
La méthode de classification utilisée pour cette étude est supervisée (algorithme : maximum de vraisemblance) : la connaissance de la zone d'étude est capitalisée et mise à

profit pour déterminer l'appartenance de chaque pixel à une classe. Plusieurs itérations ont été nécessaires afin d'obtenir une classification satisfaisante.

La classification des prises de vue a été effectuée sur les images orthorectifiées et non sur les images brutes pour des raisons de superposition des couches d'information ayant servi à la digitalisation des noyaux de classification.

## 2.4.2. Choix des classes

30 classes ont été définies pour la classification. Ce grand nombre de classes nous a permis de limiter certaines confusions. En particulier, plusieurs types de forêts et de sols (clair à sombre) ont été discriminés. Après synthèse, la classification texturale finale se compose de 7 groupes thématiques (**tableau n°3**).



**Tableau n°3 : Nomenclature retenue après regroupements thématiques opérés sur la classification texturale par maximum de vraisemblance**

## 2.4.3. Préparation des « Composition colorées »

Nous avons testé la classification par maximum de vraisemblance sur plusieurs compositions colorées :

- sur une composition RVB\* des 3 canaux résultant d'une ACP\* sur les 3 canaux initiaux de chaque image,
- sur une composition RVB\* des 3 canaux initiaux de chaque image (V\* R\* PIR\*) : solution retenue.

Avant de lancer le processus de classification, nous avons pré-découpé chaque image en deux groupes thématiques végétation/non végétation, d'après un seuillage réalisé sur l'indice de végétation normalisé (NDVI\*) appliqué à chaque image. La formule du NDVI\* est la suivante (auteurs : ROUSE *et al.*, 1974, TUCKER, 1979, cités dans GIRARD & GIRARD, 1999) :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

Afin de visualiser au mieux les contrastes sur ces compositions colorées, nous avons amélioré la dynamique d'affichage des canaux (LUT\*).

#### **2.4.4. Acquisition de données terrain**

L'acquisition de données de terrain est nécessaire pour réaliser une classification supervisée des images de télédétection. La campagne de terrain s'est déroulée en plusieurs phases du 1<sup>er</sup> juillet au 15 août 2003. Sur cette période, 15 journées pleines ont été consacrées à l'acquisition de données pour le projet TEMOS\*.

Deux objectifs étaient poursuivis :

- Une prise de contact avec le terrain : connaissance des modes d'occupation des sols et des pratiques culturales, établissement de la nomenclature. Dans cette optique, un survol de La Réunion nous a permis d'affiner notre appréhension du terrain.
- Détermination de zones d'apprentissage localisée par GPS\* pour les futures classifications (avec prises de vue photographiques).

Ces données de terrain ont été utilisées pour la classification de l'image 2002 et par extension pour l'image de 1989 (voir technique utilisée au chapitre 2.4.5.).

#### **Données à dire d'expert**

Dans un premier temps, des experts de l'agriculture réunionnaise (DAF\*, CIRAD\*, comité de pilotage de la canne) ont été sollicités afin de nous guider dans notre approche du terrain : une projection sur écran des images satellitales a été commentée. A l'issue de cette réunion, 30 points de terrain ont été numérisés (information « à dire d'expert »). L'intérêt de cette démarche était également d'associer les institutions de l'agriculture réunionnaise au projet.

#### **Relevés de terrain**

Une base de données incluant 250 relevés de terrain couvrant l'ensemble de l'île a été mise en place :

- le site devait être représentatif d'une classe thématique à distinguer.
- le site devait avoir une surface suffisante pour être repéré sans ambiguïté sur l'image.

Dans un premier temps, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH\*) exploratoire a été entreprise sur chaque image. L'intérêt de cette classification non supervisée était de nous guider dans notre approche de la diversité du terrain.

Seules les parcelles de terrain d'une surface minimale de 4 pixels ont été retenues (à l'exception du bâti). D'ores et déjà, ce seuil a exclu de la classification certains modes d'occupation des sols (le petit maraîchage notamment).

Pour plus de précision spatiale, les parcelles de terrain ont été numérisées sur l'image satellite Spot 5 de 2002. Le nombre des parcelles d'entraînement n'étant pas suffisant, nous l'avons complété par la numérisation à l'écran de parcelles au comportement numérique similaire dans l'image.



## **Base de données de photographies de terrain**

Près de 300 clichés photographiques ont été réalisés, dont certains ont été associés en panorama à l'aide du logiciel Cool 360. Afin de faciliter la visualisation de ces clichés, nous avons utilisé la fonction LinkToImage dans ArcView 3.2 qui permet d'afficher automatiquement des photographies dans un SIG\*. Une couche graphique complémentaire renseigne l'azimuth des prises de vue photographiques (script Azimuth téléchargé sur le site [www.esri.com](http://www.esri.com)).

L'objectif d'une telle base de données photographique était de disposer d'un référentiel visuel commun pour l'établissement de la nomenclature et l'implémentation des parcelles d'apprentissage de la classification.

### **2.4.5. Phase de classification des « compositions colorées »**

La classification des compositions colorées s'est déroulée en 2 phases :

- Une phase de classification texturale pixel à pixel,
- Une phase de classification structurale prenant en compte le voisinage des pixels.

#### **Pré-traitements complémentaires**

Afin d'obtenir la meilleure performance de classification, nous avons exclu de la classification les pentes de plus de 30 degrés qui sont forcément des espaces naturels à La Réunion. Ce masque des pentes de plus de 30 degrés a été réalisé à partir du MNT\* rééchantillonné à 20 m par la méthode bicubique.

Des polders ayant été bâtis (polders aéroportuaires et portuaires) entre 1989 et 2002, le trait de côte de la BD Topo 1997 a été redigitalisé sur l'image de 1989 afin de correspondre au trait de côte physique détecté.

De plus, il a été nécessaire de masquer une bande de 2 pixels sur le littoral car l'écume des vagues était classée dans le groupe thématique du bâti. Pour cela, nous avons réalisé un buffer de  $20\sqrt{2}$  mètres autour du trait de côte de la BD Topo 1997. Ce buffer a été rastérisé et appliqué comme masque géographique.

#### **Classifications texturale assistée**

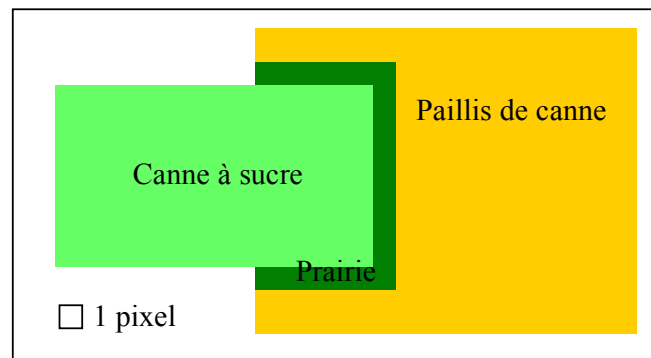
##### **> *Choix de l'algorithme de classification***

L'algorithme de classification utilisé est un algorithme statistique de classification par maximum de vraisemblance (CMV\*) sous hypothèse gaussienne. Chaque pixel est ainsi classé selon sa probabilité d'appartenance à une classe. L'hypothèse gaussienne implique que la probabilité d'occurrence d'une classe est homogène sur l'ensemble de l'image. Le comportement numérique de chaque groupe de pixel est estimé à partir du comportement numérique des noyaux associés à la classe.

L'utilisation de cet algorithme permet de compenser les effets du rééchantillonnage par convolution cubique lors du géoréférencement puisque la décision sur l'appartenance à la classe se fait par maximum de vraisemblance

Cependant, nous avons constaté quelques artefacts liés à ce mode de rééchantillonnage lors de la classification : apparition de plages cartographiques de frontière, comme dans la

figure ci-dessous où une plage cartographique de prairie est apparu à la frontière d'une plage de canne et d'une plage de paillis de canne (**figure n°6**).



**Figure n°6 : artefact lié au mode rééchantillonnage par convolution bicubique (détecté lors de la phase de classification)**

#### **> Digitalisation des noyaux**

Pour élaborer la classification, des parcelles d'entraînement ont été digitalisées à l'écran pour chaque classe déterminée. Les parcelles ont été définies à partir des repérages et des photographies de terrain. Ces parcelles sont réparties de façon homogène sur l'ensemble de la zone d'étude et leur nombre varie selon l'hétérogénéité de la classe. Pour plus de validité géométrique, et en tenant compte des contraintes de nébulosité, les parcelles ont été dessinées sur l'image Spot 5 du 7 juillet 2002.

Ces noyaux ont été redigitalisés, regroupés ou éliminés au cours des différentes itérations de la classification. Les parcelles d'entraînement sont composées d'au moins 200 pixels (à l'exception de la classe du bâti composée d'environ 100 pixels).

Afin d'obtenir des classifications comparables, les noyaux sont le plus possible les mêmes sur les deux images. La digitalisation des noyaux a ainsi été effectuée dans les zones de non-changements déterminées grâce à l'ACP\* multirate. Bien sûr, cette technique n'a été utilisée que pour une partie des groupes thématiques (en particulier la végétation naturelle). Du fait des variations liées aux pratiques culturales, les noyaux du groupe thématique « canne à sucre » ont été digitalisés séparément sur chaque image.

#### **> Table de séparabilité**

La table de séparabilité montre que les parcelles d'entraînement se distinguent très bien (au moins 90%). Le seuil d'exigence quant à la séparabilité des classes a été fixé au-delà des 70 % généralement requis (GIRARD & GIRARD, 1999). En complément, on a aussi utilisé l'image des distances statistiques aux noyaux d'origine.

#### **> Techniques périphériques d'amélioration de la classification texturale**

Les difficultés que nous avons rencontrées au cours de la classification concernaient des confusions :

- prairie/canne à sucre,
- canne à sucre/autre végétation (en particulier une formation buissonnante à choka, la vigne marronne et des formations de fougères),
- paillis de canne/bâti.

Constatant visuellement ces confusions, et connaissant leur importance stratégique pour le projet, nous avons insisté sur la discrimination de ces groupes :

- en distinguant plusieurs classes de canne et de prairie sur la composition colorée, d'après leur activité chlorophyllienne corrélée au canal PIR\* (peu, moyennement, très active)
- En conduisant des CAH\* sur certains groupes thématiques afin de discriminer plus précisément certaines classes dont on ne pouvait appréhender visuellement la diversité des comportements numériques à l'écran. Les CAH\* ont été effectuée sur les pixels sélectionnés par masquage sur l'image de l'ACP\* en 3 composantes ou sur l'image transformée après l'application d'un modèle lambertien de correction des effets du relief sur les valeurs des comptes numériques.

Les résultats des divers classifications ont ensuite été regroupés par combinaison arithmétique des canaux.

### **> Performance des classifications**

L'évaluation de la performance de la classification sur l'image de 2002 a été effectuée à partir des points pris sur le terrain et par photo-interprétation de l'image Spot 5 (choix des points de contrôle par combinaison d'un échantillonnage aléatoire et d'un échantillonnage aléatoire stratifié, au moins 30 points de contrôle par classe). Cette évaluation (cf **Cartes 2 et 3 p 26-27**) sera complétée par des travaux de terrain visant à valider la classification effectuée sur une image Spot 5 (résolution 2.5 m) dans le cadre du module TEMOS Actualisation. Ces investigations complémentaires seront effectuées du 7 au 18 novembre (5 opérateurs, objectif de 200 points de terrain).

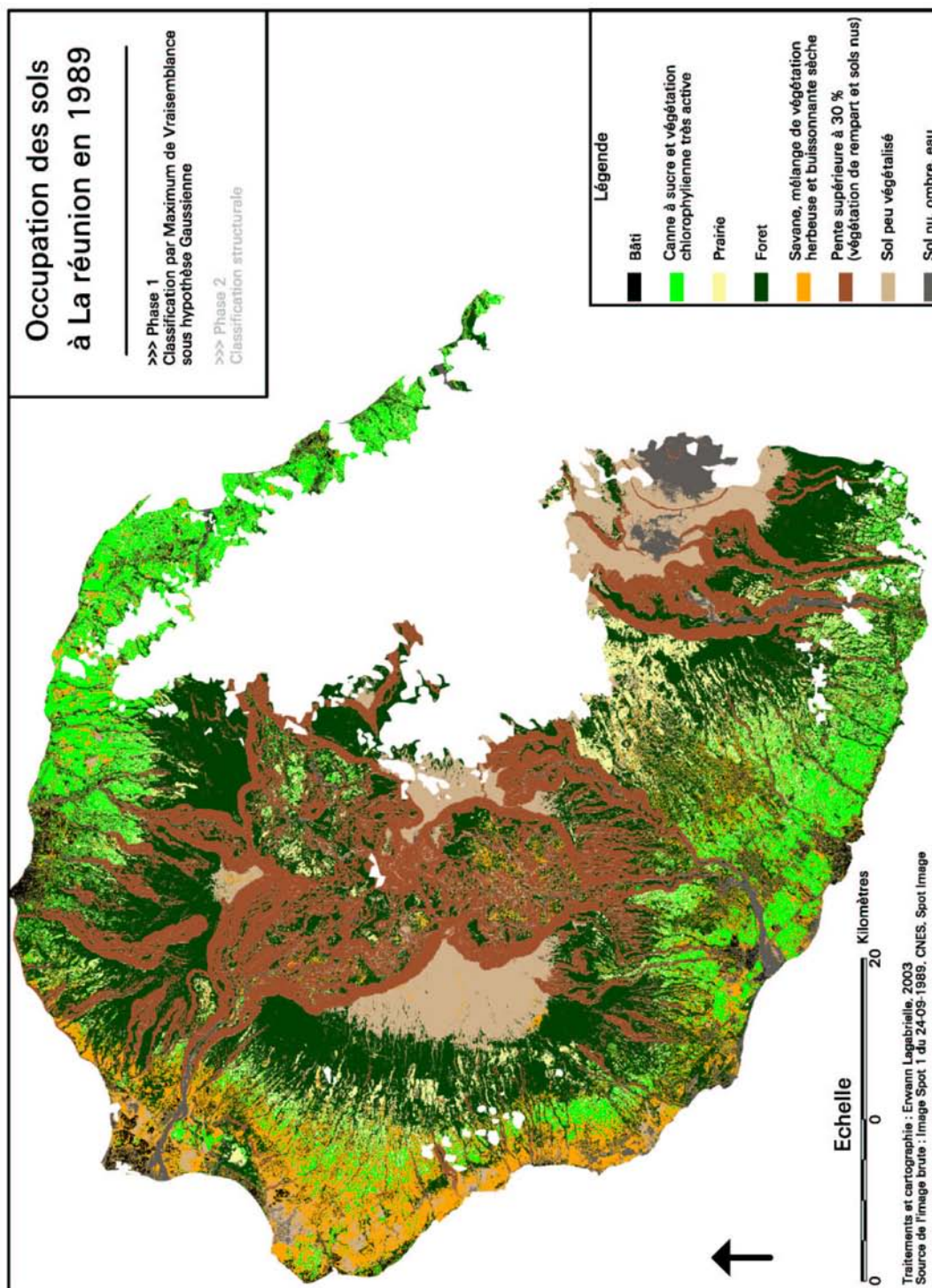
La performance globale de la classification de l'image de 2002 est de 79.19 %. On constate une bonne performance pour le bâti (95.83 % précision utilisateur). Le groupe thématique « canne à sucre et végétation très active » est classé avec une précision utilisateur de 88 %. Cependant, les classes de « végétation herbeuse/buissonnante sèche et savane » et de prairie sont très moyennement classées, ces classes se confondant entre elles.

La performance de la classification de l'image de 1989 n'a pas encore été évaluée. Deux options de validation sont envisagées : une évaluation à partir de photographies aériennes réalisée par l'IGN (travail long de géoréférencement des photographies), ou une évaluation à partir de la classification de l'image de 2002 en considérant que les changements entre les deux images sont marginaux. On peut néanmoins supposer que la technique de classification mise en œuvre devrait permettre d'atteindre un niveau de performance similaire sur les deux images (les tests réalisés à partir des deux images classées par maximum de vraisemblance montrent une similarité de 61 % entre les deux images). Nous avons constaté que ce seuil sera très largement amélioré grâce à la classification structurale, moyennant la disparition des pixels thématiques isolés.

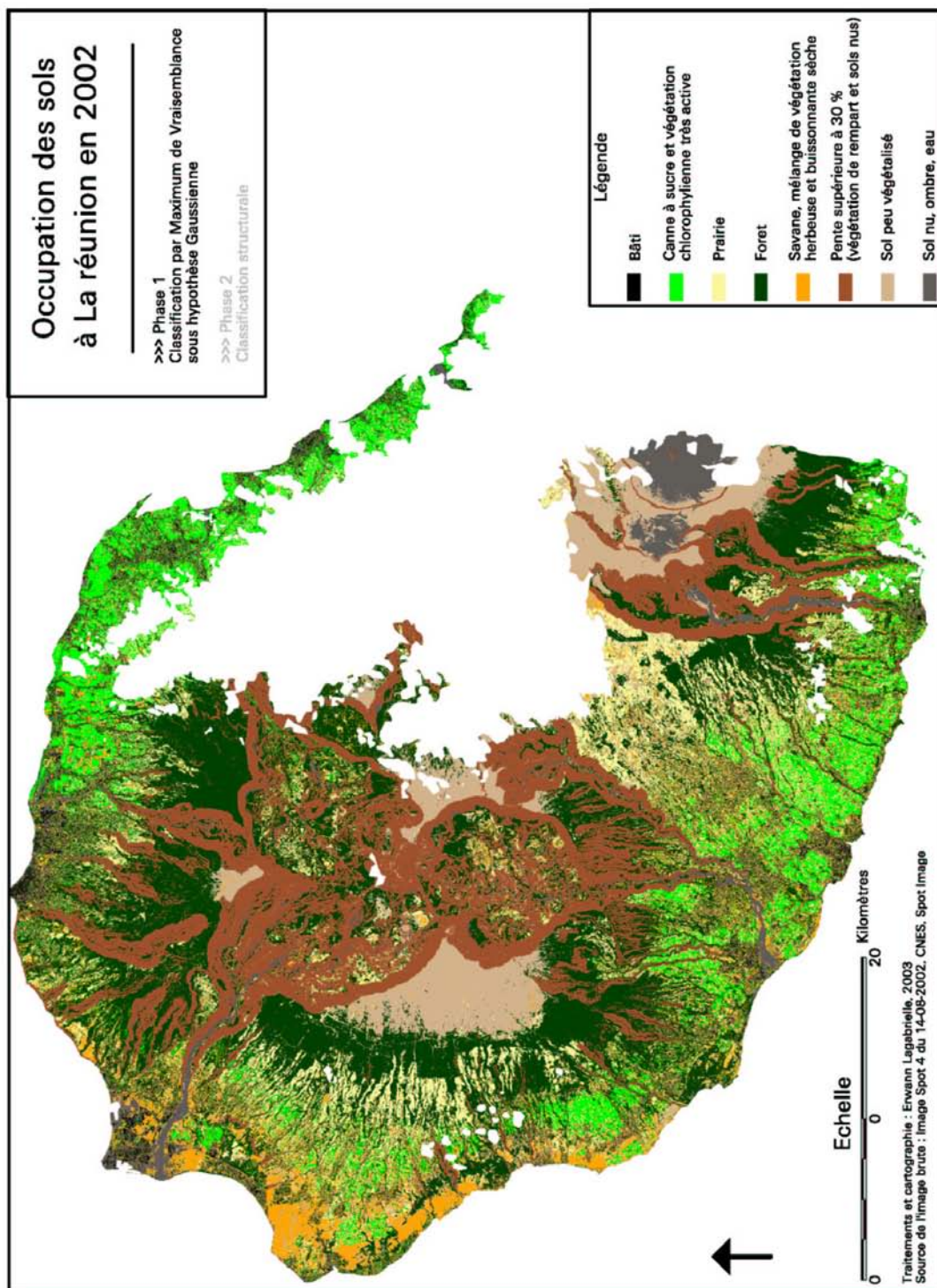
### **p 26-27**

**Cartes 2 : Occupation des sols à La Réunion en 1989 (classification par maximum de vraisemblance)**

**Cartes 3 : Occupation des sols à La Réunion en 2002 (classification par maximum de vraisemblance)**







## Classification structurale

### > *Principe et application*

La classification structurale est un mode de classification des images qui prend en compte le voisinage des pixels. C'est un outil de simplification par intégration spatiale (GIRARD & GIRARD, 1999). Une classification structurale a ainsi été effectuée sur chacune des deux classifications issues du traitement par maximum de vraisemblance.

Deux types de noyau ont été définis :

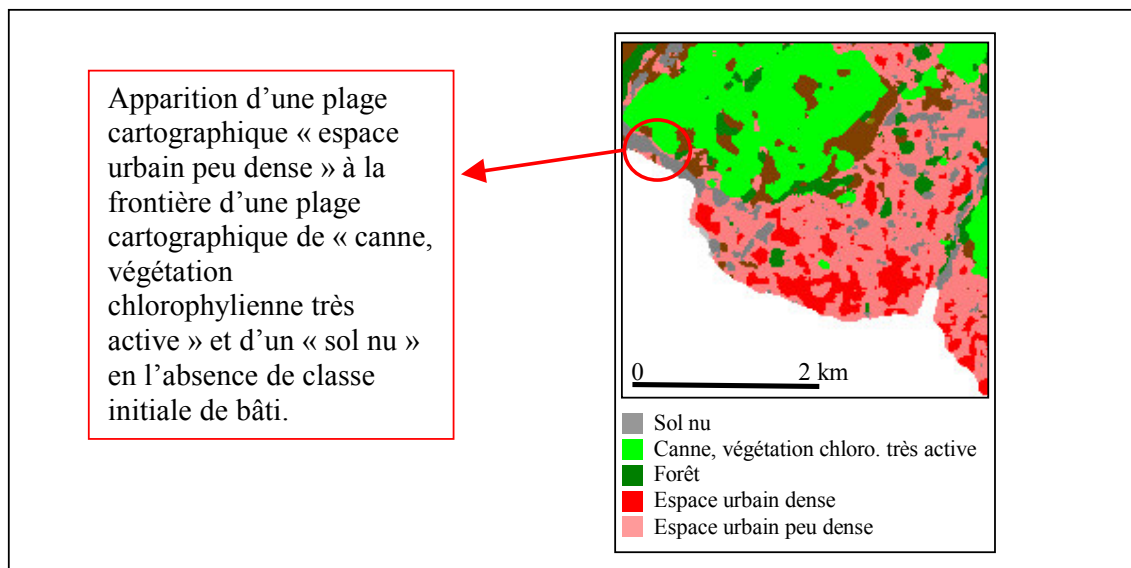
- Des noyaux purs, correspondant aux groupes thématiques de la classification par maximum de vraisemblance.
- Deux noyaux composites (« espace urbain dense », « espace urbain peu dense ») combinant le semis de pixels de bâti, de sol nu et de végétation des zones urbanisées.

Lors des approximations, plusieurs tailles de fenêtre ont été testées (3x3, 5x5 et 7x7). Nous avons opté pour une fenêtre de taille 5x5. Les fenêtres de taille supérieure entraînaient une érosion trop importante des plages cartographiques.

### > *Performance*

Actuellement, nous affinons le choix des noyaux des deux classes d'espace urbain pour la classification. Les tests sont en cours sur chaque image et l'affectation de certaines zones de frontière entre « forêt » et « sols nus » à la classe « espace urbain peu dense » nous confronte à une difficulté de classification (**figure n°7**).

En effet, l'espace urbain réunionnais est peu densément bâti, très boisé et de ce fait il inclut un mélange à dominante végétale et minérale (les sols nus) qui « inhébe » la composante « métallique » des toitures en tôle. On retrouve donc, sur l'image classée structuralement, des frontières d'urbanisation à la lisière des forêts et des sols nus. La classification structurale de deux images sera achevée début novembre



**Figure n°7 : Artefact lié à la classification structurale**

**> Matrice de confusion de la classification de l'image Spot 4 du 14-08-2002 (après traitements texturaux et structuraux)**

Calcul effectué par le logiciel Erdas à partir de points de contrôle déterminé par tirage aléatoire et tirage aléatoire stratifié par groupe thématique (le nombre de points de contrôle sera complété par une campagne de validation terrain du 7 au 15 novembre 2003).

**Précision totale = 79,19 %**  
**Coefficient Kappa = 0,7569**

	<i>Sol nu</i>	<i>Bâti</i>	<i>Sol peu végétalisé</i>	<i>Canne Vég. Chloro. Act.</i>	<i>Forêt</i>	<i>Prairie</i>	<i>Savane Vég. Buis. Herb. sèche</i>	Erreur de déficit	Précision réalisateur
<i>Sol nu</i>	24	2	0	2	0	1	0	14,19	85.71
<i>Bâti</i>	0	23	0	0	1	0	0	14,81	85.19
<i>Sol peu végétalisé</i>	3	0	20	3	0	0	0	16,67	83.33
<i>Canne Vég chloro. Act.</i>	1	1	1	27	0	1	2	28,95	71.05
<i>Forêt</i>	0	1	0	0	22	2	0	29,03	70.97
<i>Prairie</i>	0	0	1	4	4	21	2	19,23	80.77
<i>Savane Vég. Buis. Herb. sèche</i>	0	0	2	2	4	1	19	18,39	82.61
Erreur d'excédent	17,24	4,17	23,08	18,18	12,00	34,37	32,14	<b>%</b>	
Précision utilisateur	82.76	95.83	76.92%	81.82	88.00	65.63	67.86		

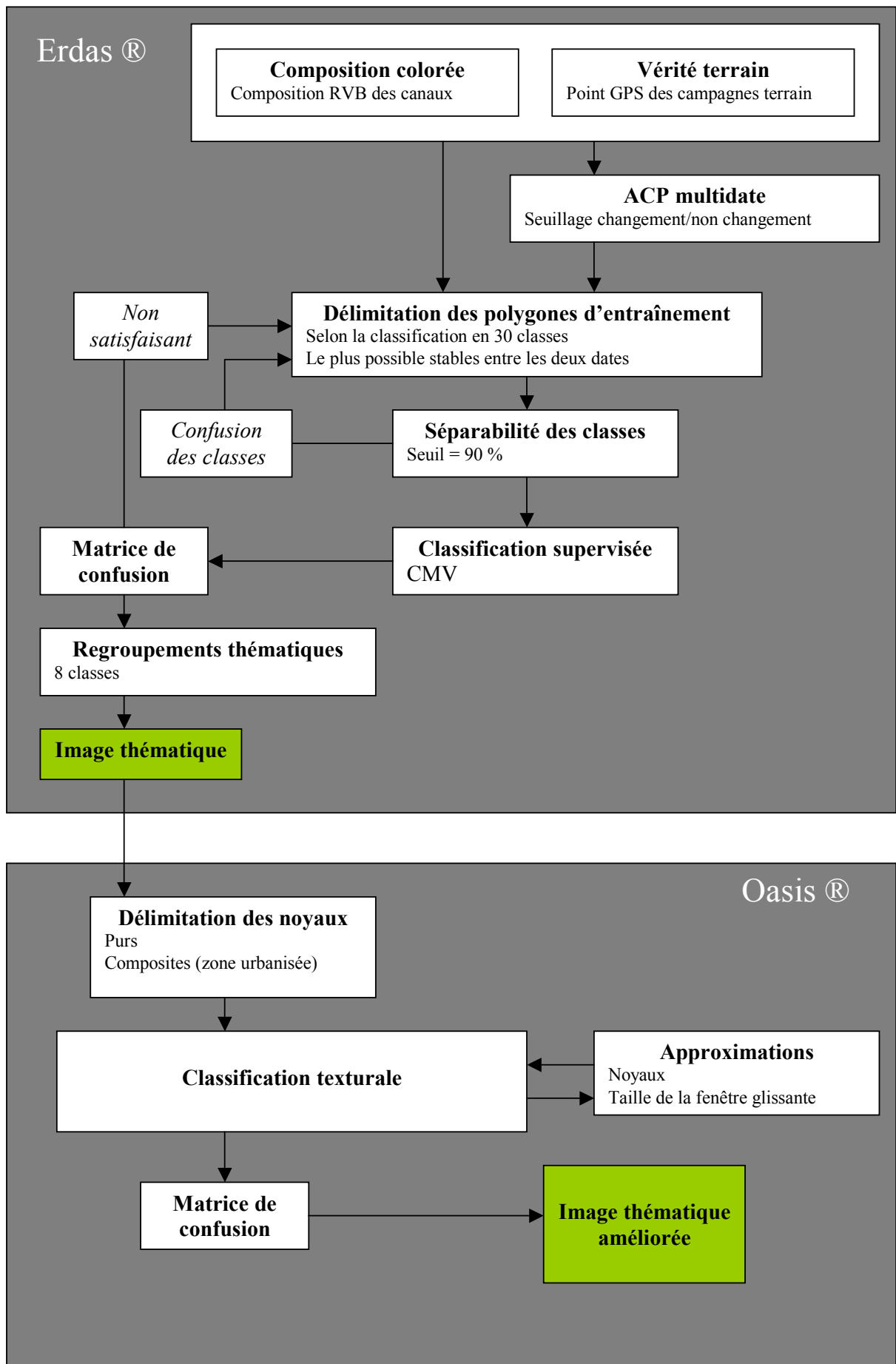
**Tableau n°4 : Matrice de confusion de la classification de l'image Spot 4 du 14-08-2002**

**> Synthèse des traitements**

La figure présentée page suivante (**figure n°8**) permet de mieux visualiser les étapes des traitements effectués sur les images en vue de leur classification texturale puis structurale.

(Page suivante)

**Figure n°8 : Schéma de synthèse des phases de classification texturale puis structurale des images (adapté de BANCAREL, 2002)**





### **3. SECONDE PHASE : INTEGRATION A UN SIG ET ANALYSE SPATIALE**

#### **3.1. Procédure d'intégration des données**

Les classifications structurales de l'image de 1989 et de l'image de 2002 seront intégrées à un Système d'Information Géographique (formats raster et vecteur). Les métadonnées seront également renseignées.

#### **3.2. Analyse spatiale**

Les cartographies des modes d'occupation des sols seront comparées via les techniques d'analyse spatiale dans un SIG\*. L'évolution spatiale des modes d'occupation des sols sera analysée par thématique (Progression/régression ? Où ? Au profit de quel autre mode d'occupation ?) et on confrontera ces résultats à des sources exogènes de données (données démographiques, statistiques agricoles...). On pourra également analyser l'évolution des formes des plages cartographiques.

L'interprétation des changements interviendra dans un second temps et sera conduite en partenariat avec l'équipe de chercheurs du projet et les opérateurs de l'aménagement du territoire à la Réunion (EPCI\*, DAF\*, Région...).

## ***CONCLUSION ET PERSPECTIVES***

---

Pour cette étude de cartographie des dynamiques des mode d'occupation des sols à La Réunion, nous avons testé plusieurs méthode de télédétection des changements. Nous avons finalement mis au point une méthode expérimentale combinant l'ACP\* multivariate et la classification texturale/structurale. Les résultats partiels que nous avons obtenus semblent satisfaisants (ils seront évalués plus précisément au cours du mois de novembre).

L'analyse visuelle des premiers résultats des traitements nous a ainsi permis d'identifier les évolutions suivantes depuis 1989 à La Réunion :

- L'espace urbain s'est largement développé sur l'ensemble de l'île, en particulier sur le littoral sous le vent de l'île, à l'est de Saint-Denis, et de façon diffuse dans le sud.
- La progression des espaces urbains s'est faite aux dépend du territoire cannier. A l'inverse, la culture de la canne s'est développée sur les nouveaux périmètres irrigués de l'ouest.
- On note également une très nette extension des prairies dans les hauts. On constate ainsi que des coupes on été effectuées à la lisière basse des forêts d'altitude.

Du fait des limites intrinsèques des techniques de détections des changements sur des images haute résolution, la télédétection reste un outil d'investigation à associer à d'autres techniques pour l'analyse de l'évolution des modes d'occupation des sols (analyse des recensements agricoles et de population, étude de l'évolution des Plans d'Occupation des sols, etc...).

On conseillera la méthode suivie pour cette étude dans le cadre de projets ne disposant pas des moyens humains ou des compétences nécessaires pour réaliser une étude de photo-interprétation comparée.

L'analyse spatiale des résultats de classification sera approfondie à l'aide des outils des Systèmes d'Information Géographique durant le mois de novembre, le projet devrait alors répondre aux exigences du commanditaire.

Les résultats définitifs du projet seront présentés aux institutions réunionnaises impliquées dans l'aménagement du territoire au cours du mois de novembre. Egalement, nous souhaitons capitaliser l'expérience de TEMOS\* pour proposer un projet similaire dans le cadre de la coopération régionale sur la zone Océan Indien.

---

## **BIBLIOGRAPHIE TELEDETECTION ET SIG**

BANCAREL S. - 2002 - Apport des SIG et de la télédétection à la détermination d'unités dynamiques des paysages, Etude des formations végétales et de leurs modalités d'occupation de l'espace - Cas du Causse du Larzac, 45p, Rapport Mastère SILAT\*, Montpellier

BONN F. - 1996 - Précis de télédétection, Volume 2 Applications thématiques. Chapitre 13 : Utilisation du sol urbain et périurbain. Sainte-Foy, 2 volumes, p 478-532

CHAVEZ P. S., MACKINNON D. J. - 1994 - Automatic detection of vegetation changes in the Southwestern United States using remotely sensed images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, Vol. 60, N°5, p 571-583

COLLINS J. B., WOODCOCK C. E. - 1996 - An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. Remote Sensing Environment, 1996, Vol. 56, p 66-77

GIRARD, 1999 M.-C. & GIRARD, 1999 C.M. - 1999 - Traitement des données de télédétection. Paris, 529p

INGLADA J. - 2001 - Etat de l'art en détection de changements sur les images de télédétection. Toulouse, 20p

MAS J. F. - 2000 - Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, Vol. 26, N°4, p 349-362

MOISAN Y., BERNIER M., DUBOIS J. M. M. - 1999 - Détection des changements dans une série d'images ERS-1 multitudes à l'aide de l'analyse en composantes principales. International Journal of Remote Sensing, 1999, Vol. 20, N°6, p 1149-1167

SANDERS L. - 1989 - *L'analyse statistique des données en géographie*. Montpellier: RECLUS. 267 p

SINGH A., HARRISON A. - 1985 - Standardized principal components. International Journal of Remote Sensing, 1985, Vol. 6, N°6, 883-896

SPARR S. - 1998 - Etude diachronique sur images SPOT dans les terroirs viticoles du bassin de Valréas, p 119-132, Micro-projet SILAT\*, Grignon

SONG C., WOODCOCK C. E. , SETO K. C. , LENNEY M. P. et MACOMBER S. A. - 2001 - Classification and change detection using Landsat TM data : when and how to correct atmospheric effects? Remote Sensing and Environnement, 2001, Vol. 75, p 230-244

ULBRICHT K. A., HECKENDORFF W.D. - 1998 - Satellite images for recognition of landscape and landuse changes. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, Vol. 53, p 235-243

[http://www.bondy.ird.fr/cvd/BNETD/Page\\_0.htm](http://www.bondy.ird.fr/cvd/BNETD/Page_0.htm) - juin 2003

[http://www.iaurif.org/fr/ressources\\_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/NROS\\_2.pdf](http://www.iaurif.org/fr/ressources_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/NROS_2.pdf) - juin 2003

<http://www.fao.org/DOCREP/004/Y3642F/Y3642F00.HTM> - juin 2003

<http://www.asi.insa-rouen.fr> - octobre 2003

---

### **LOGICIELS TELEDETECTION ET SIG**

Arcview (SIG), <http://www.esri.com> - juillet 2003

Erdas (télédétection), <http://www.erdas.com> - juillet 2003

Oasis (télédétection), <http://www.lacan.grignon.inra.fr> – juillet 2003

---

### **BIBLIOGRAPHIE SUR LA ZONE D'ETUDE**

Conseil Régional de La Réunion - 2002 - Enjeux et défis de La Réunion à l'horizon 2020. Conseil Economique et Social Régional. Saint-Denis (La Réunion), 106 p

JAUZE J-M - 2000 -Villes et patrimoine à la Réunion. Paris, 302 p

INSEE – 2002 – Tableau économique de La Réunion 2002-2003. Saint-Denis (La Réunion), 210 p

<http://www.environnement.gouv.fr/reunion/reunchiffre.htm> - octobre 2003

[http://www.reunion.equipement.gouv.fr/planifier\\_aménagement/outil\\_aménagement/SAR.htm](http://www.reunion.equipement.gouv.fr/planifier_aménagement/outil_aménagement/SAR.htm) - octobre 2003

# ***TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX***

---

---

## **TABLEAUX**

Tableau n°1 : Caractéristiques techniques et géographiques des images retenues.....	p 9
Tableau n°2 : planning de projet.....	p 11
Tableau n°3 : Nomenclature retenue après regroupements thématique sur la classification texturale par maximum de vraisemblance .....	p 21
Tableau n°4 : Matrice de confusion de la classification de l'image Spot 4 du 14-08-2002.....	p 29

---

## **FIGURES**

Figure n°1 : Schéma simplifié de la chaîne de traitement des images.....	p 13
Figure n°2 : Corrections géométriques des images.....	p 15
Figure n°3 : Préparation des images.....	p 17
Figure n°4 : Traitements des images pour la détection des changements par ACP multirate.....	p 18
Figure n° 5 : Principe de l'ACP multirate pour la détection des changements.....	p 19
Figure n°6 : Artefact lié au mode rééchantillonnage par convolution bicubique (détecté lors de la phase de classification) .....	p 24
Figure n°7 : Artefact lié à la classification structurale.....	p 28
Figure n°8 : Schéma de synthèse des phases de classification texturale puis structurale des images.....	p 30

---

## **CARTES**

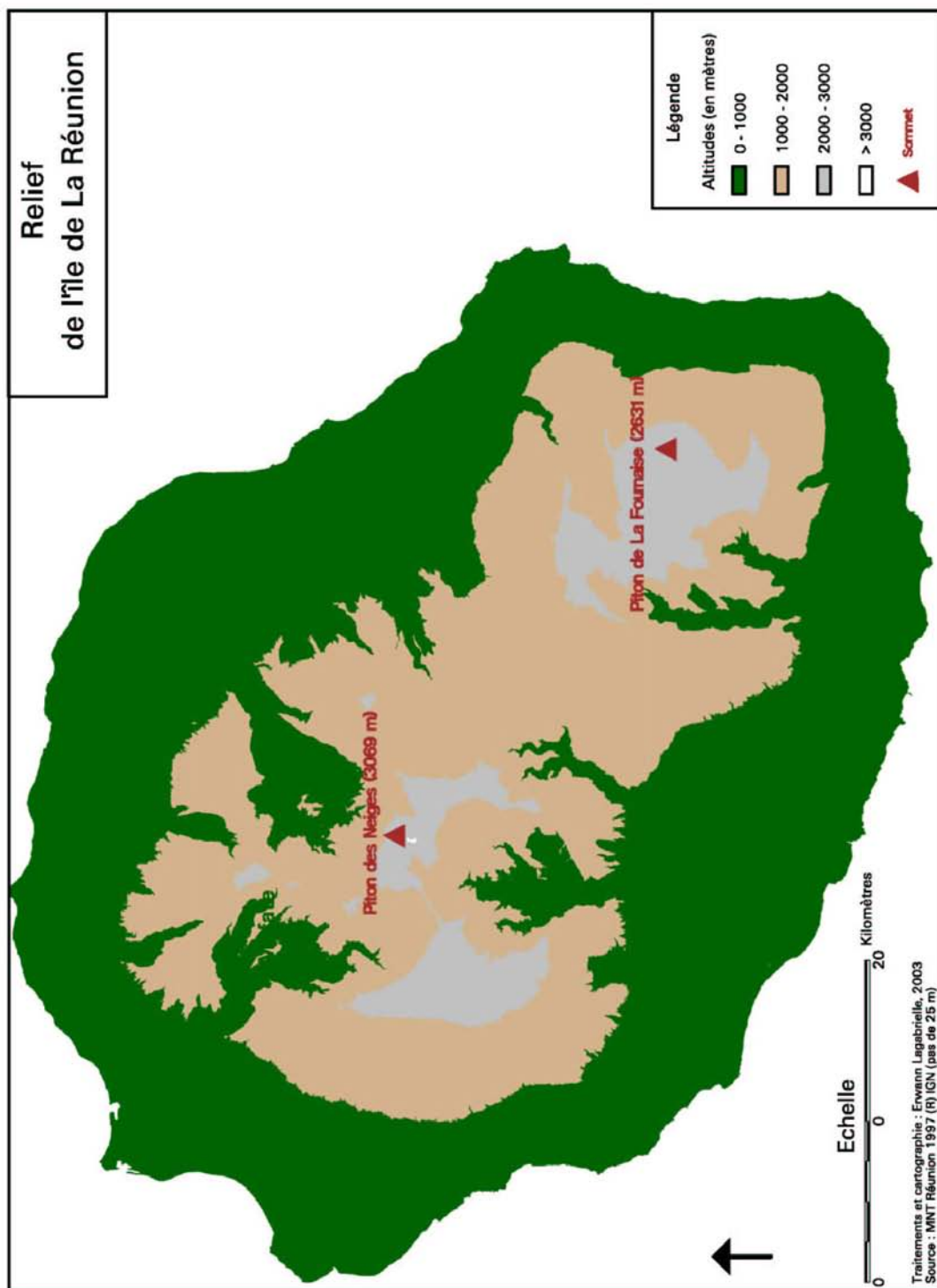
Carte 1 : Situation de l'île de La Réunion.....	p 6
Cartes 2 : Occupation des sols à La Réunion en 1989 (classification par maximum de vraisemblance).....	p 26
Cartes 3 : Occupation des sols à La Réunion en 2002 (classification par maximum de vraisemblance).....	p 27

**ACP** : Analyse en Composante Principale  
**CAH** : Classification Ascendante Hiérarchique  
**Cirad** : Centre International de Recherche en Agronomie pour le Développement  
**CMV** : Classification par Maximum de Vraisemblance  
**CNES** : Centre National d'Etudes Spatiales  
**DAF** : Direction de l'Agriculture et de la Forêt  
**DDE** : Direction Départementale de l'Equipeement  
**EPCI** : Etablissement Public de Coopération Intercommunale  
**GCPs** : Ground Control Points  
**GPS** : Global Positioning System  
**IGN** : Institut Géographique National  
**INSEE** : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques  
**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement  
**LUT** : Look Up Table, table de coloration  
**MIR** : Moyen Infrarouge  
**NDVI** : Normalised Difference Vegetation Index  
**ONF** : Office National des Forêts  
**PIR** : Proche Infrarouge  
**R** : Rouge  
**RGP** : Recensement général de la population  
**RMSE (ou RMS)** : Root Mean Square Error  
**RVB** : Rouge, Vert, Bleu  
**SAR** : Schéma d'Aménagement Régional  
**SAU** : Surface Agricole Utile  
**SIG** : Système d'Information Géographique  
**SILAT (Mastère spécialisé)** : Systèmes d'Informations Localisées pour l'Aménagement des Territoires  
**SPOT** : Satellite Probatoire d'Observation de la Terre  
**TEMOS (projet)** : Télédétection pour l'Etude des Modes d'Occupation des Sols  
**V** : Vert  
**UTM** : Universal Transverse Mercator

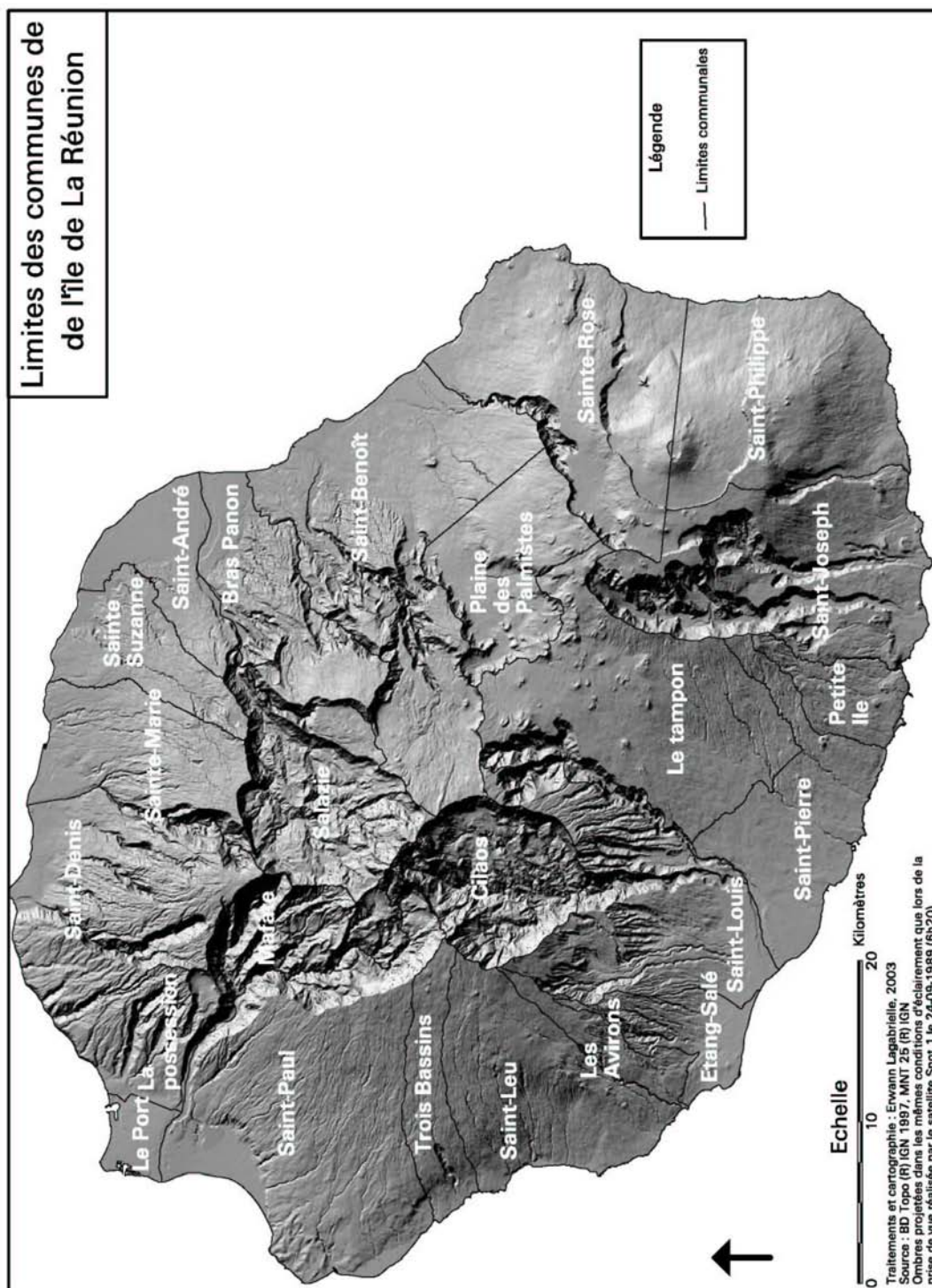
<b>Annexe 1</b>	<b>Relief de l'île de La Réunion.....</b>	<b>p 38</b>
<b>Annexe 2</b>	<b>Communes de l'île de La Réunion.....</b>	<b>p 40</b>
<b>Annexe 3</b>	<b>Principe de l'Analyse en Composantes Principales.....</b>	<b>p 42</b>
<b>Annexe 4</b>	<b>Détection du bâti par seuillage visuel d'une composante d'ACP multidate.....</b>	<b>p 44</b>

## ***Relief de l'île de La Réunion***





## ***Communes de l'île de La Réunion***



***Principe de l'Analyse  
en Composantes Principales***

## Principe de l'Analyse en Composantes Principales

(d'après SANDERS, 1996 et Projet STATS (<http://www.asi.insa-rouen.fr>), 2003)

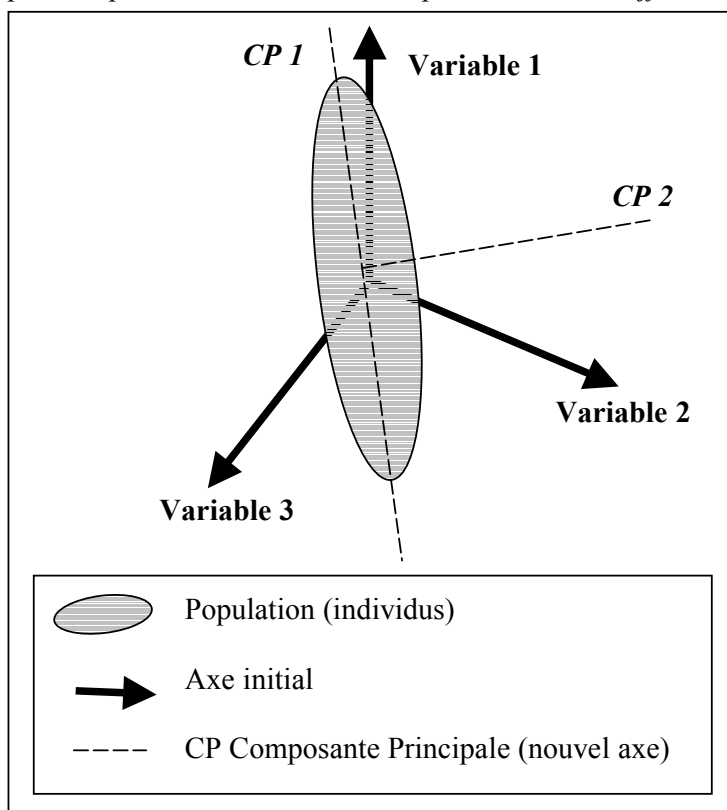
L'objectif principal de l'ACP est de réussir à exprimer un système complexe de données de dimension quelconque, représenté par un tableau dit Individus/Variables (pour notre étude Pixels/Canaux), dans un plus petit nombre de dimensions, tout en minimisant la perte d'informations engendrée.

Ce processus consiste à construire de nouveaux caractères synthétiques à partir de facteurs obtenus par combinaisons linéaires des variables initiales. Ce sont ces nouveaux caractères synthétiques qui sont appelés composantes principales. L'étude des données pourra alors être réduite à ces composantes principales, si elles sont suffisamment représentatives.

Dans le cadre des représentations graphiques, les composantes principales sont assimilés aux axes. Ainsi, dans le cadre d'une représentation des données dans un espace à deux dimensions, l'axe des abscisses représentera la première composante principale, celle qui explique la plus grande partie de l'information d'origine, et l'axe des ordonnées sera la deuxième composante principale, celle qui explique la plus grande partie de l'information restante.

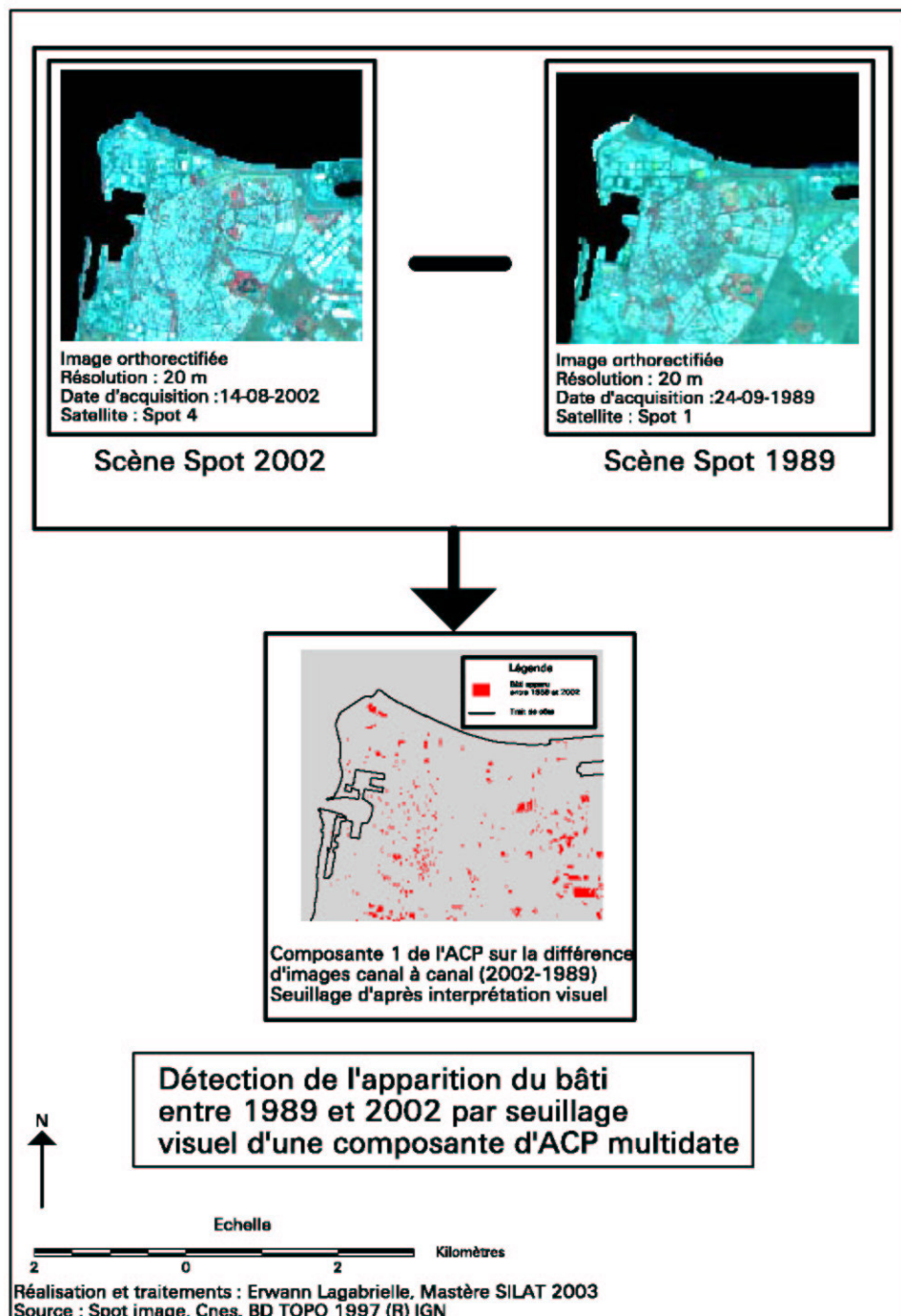
La direction de l'axe d'allongement maximum du nuage de points est donnée par le vecteur propre de la matrice des corrélations associée à la plus grande valeur propre de cette matrice. La composante principale est une combinaison linéaire des variables (voir **figure a**).

*Remarque : l'ACP ne peut s'appliquer que si les variables quantitatives qu'on étudie ne sont pas indépendantes deux à deux et possèdent des coefficients de corrélation non nuls.*



**Figure :**  
Une population d'individus caractérisés par 3 variables (axes initiaux) exprimés par 2 composantes principales (nouveaux axes factoriels)

***Détection du bâti par seuillage visuel d'une  
composante d'ACP multirate***



## **REMERCIEMENTS**

---

En premier lieu je souhaite adresser toute ma reconnaissance à Cécile MARTIGNAC (Cirad Tera), qui m'a accordé sa confiance et son soutien pour la conduite de ce module du projet TEMOS. Je suis heureux que notre collaboration se poursuive en 2004.

Mes remerciements également à Pascale METZGER (IRD), jeune senior de la gestion de projet, ainsi qu'à Jean-François, Saint-Ex'péi,

Merci à Bernard LORTIC de l'IRD Bondy qui nous a apporté sa riche expérience du traitement des images,

Merci également à Laurent DURIEUX (IRD) et Guilhem GRELLET (Cirad Amis) pour leur enthousiasme efficace,

Ma gratitude à Agnès BEGUE, Marc DESPINOY et Eric BAPPEL (Cirad Amis - Maison de La Télédétection, Montpellier) ainsi qu'à Denis POUZET (Cirad CA – Réunion).

Cette étude n'aurait pu se faire sans le concours du CNES (QTIS, BD\_Isle Réunion), nous remercions en particulier Hélène DE BOISSEZON et Michel PREVOST,

Merci Marie pour ton précieux soutien, mon soleil...



## RESUME

La Réunion est une île tropicale de l'Océan Indien confrontée à de fortes dynamiques spatiales : extension des franges urbaines, phénomène de mitage de l'espace agricole par l'habitat individuel, existence de zones naturelles protégées, développement de l'élevage et réduction de l'espace cannier. Les équipes du CIRAD et de l'IRD réunies au sein du projet TEMOS tentent de comprendre, dans une double approche spatiale et humaine, les relations entre les dynamiques spatiales et les stratégies foncières.

Dans ce cadre, une étude de l'évolution des modes d'occupation des sols à La Réunion a été conduite sur des images de télédétection à haute résolution prises en 1989 et 2002 (satellites Spot). Deux méthodes de télédétection des changements ont été testées : l'Analyse en Composantes Principales multitemporelles et la comparaison de classifications. La méthode que nous avons élaboré combine finalement ces deux procédés de télédétection des changements. L'intégration des résultats à un SIG permettra d'analyser plus finement les changements d'occupation des sols observés.

L'enjeu de cette étude va au-delà du simple objet de recherche scientifique puisque les résultats du projet constitue un outil d'aide à la décision d'aménagement pour La Réunion.

*Les données utilisées pour cette études sont issues de la BD\_Isle du CNES ([http://medias.obs-mip.fr/isle\\_reunion/](http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/)).*

### **Mots-clés :**

**Télédétection, SIG, Occupation des sols, Détection des changement, Classification supervisée, Analyse en Composantes Principales, Satellite Spot, Dynamiques spatiales, Aménagement du territoire, Île de La Réunion**

## ABSTRACT

La Réunion is a French tropical island located in the Indian Ocean. This island is confronted with strong spatial dynamics: extension of urban fringes, urbanization of rural lands, existence of protected areas and decrease of sugar cane areas. These various uses create fierce competition for land.

Through both spatial and human approaches, the TEMOS project and affiliated research centers (Cirad-Tera, IRD) try to understand the interactions between types of land allocations.

To study the land use changes at La Reunion, a survey using remote sensing tools and high-resolution data from 1989 and 2002 has been undertaken during the Master's project. Two remote sensing methods for detecting these changes have been tested: the first one based on Principal Component Analysis of multitemporal data and the second one based on comparison of classifications. Finally, the solution we chose uses both methods.

Integration of the results in a Geographic Information System will allow us to more accurately analyze the land use changes. The main objective is to provide a helpful tool for decision makers to adapt land planning policy in a sustainable way and preserve the development of La Réunion Island.

*Remote sensing datas from BD\_Isle - CNES ([http://medias.obs-mip.fr/isle\\_reunion/](http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/)).*

### **Key words :**

**Remote sensing, GIS, Land use, Change detection, Supervised classification, Principal Components Analysis, Spot satellite, Spatial dynamics, Territory management, Réunion island**